

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO
Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

CONFORT RESPIRATORIO EN ZONAS DE ALTURA Enriquecer el Aire con Oxígeno Biogénico

María del Carmen Valentina Jordán Urioste

Tesis para optar por el Grado de Maestra en Diseño
Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del jurado:

Dra. Marcia Morales Ibarria
Directora de la Tesis

Dra. Esperanza García López
Codirectora de la Tesis

Dr. Manuel Gordon Sánchez
Dr. José Roberto García Chávez
Dr. Hermilo Salas Espíndola

México D.F.
Diciembre 2012

*A mi madre,
quién me enseñó a ser libre*

“rayando el sol en aquella inmensidad de nieves y en aquellas empinadas laderas y blancos costados y cuchillas de tan dilatadas sierras, hacen una vista que aún a los que nacemos allí y que estamos acostumbrados a ella, nos admira y da motivos de alabanza al creador, que tal belleza pudo crear”.

Alonso de Ovalle

Resumen

La calidad del aire en el interior de los edificios usualmente se asocia y compara con la pureza de aire exterior que puede estar contaminado, en mayor o menor medida, dependiendo del lugar donde se ubique la edificación y otros factores locales como el movimiento del viento y la ubicación de posibles fuentes de contaminación. En ciudades o asentamientos en zonas de altura el problema de la calidad del aire puede estar también relacionado con la contaminación, sin embargo, en estas zonas el aire está caracterizado por la escasez de oxígeno, por lo tanto la calidad del aire en zonas de altura debe relacionarse con ambos aspectos.

Debido a que la presión atmosférica disminuye a medida que se incrementa la altitud, la cantidad de oxígeno en zonas de altura es mucho menor que a nivel del mar, lo cual implica que el organismo humano se somete a un estado de estrés constante para poder cumplir con sus funciones normales.

Estudios recientes han revelado algunas diferencias entre las personas que viven a largo plazo en la altitud, personas recién aclimatadas a este tipo de ambientes y las poblaciones que tienen varias generaciones viviendo en ellos, en mayor o menor grado, todos ellos se ven expuestos a un estrés fisiológico debido a una atmósfera pobre en oxígeno. La creación de una atmósfera artificial, con mejores niveles de oxígeno hacia el interior de las edificaciones, puede mejorar el confort de las personas e incluso evitar las enfermedades que aparecen como consecuencia de la vida en este tipo de hábitats.

Por otra parte, se sabe que la atmósfera ha sido creada y es constantemente renovada a través del proceso de la fotosíntesis y que las microalgas son parte muy importante del mismo, actualmente estos microorganismos están siendo estudiados por su eficiencia en la producción de biomasa, misma que el ser humano puede aprovechar de muchas formas ya sea como energía renovable, aditivo para la alimentación, para la medicina y también como agentes de purificación del medio ambiente ya que son capaces tanto de nutrirse de CO_2 como de desarrollarse en aguas residuales o industriales.

Tomando en cuenta que en zonas de altura la vegetación es escasa, el presente trabajo analiza la posibilidad de mejorar la calidad del aire interior, enriqueciéndolo con oxígeno biogénico producido por microalgas. La propuesta además considera el aprovechamiento de la biomasa y el beneficio medioambiental consecuente. Para tal efecto, se hizo una extensa revisión bibliográfica sobre los diferentes aspectos a considerar respecto al cultivo de microalgas y respecto al confort y bienestar del ser humano en zonas de altura.

Asumiendo el porcentaje de oxígeno a introducir para enriquecer el aire, en base a los cálculos de renovación de aire, se ha determinado la cantidad de oxígeno necesario para enriquecer el aire de algunos espacios de una escuela de la Ciudad de La Paz, Bolivia, objeto del presente estudio.

Con este resultado y en base a la bibliografía especializada se calculó el volumen de cultivo que sería necesario para producir la cantidad de oxígeno necesaria en el periodo de una hora, de tal manera que a medida que se consuma el oxígeno sea renovado por la actividad fotosintética de las microalgas.

A pesar de que el volumen de fotobiorreactores resultante es demasiado grande como para implementarlo, no cabe duda alguna que el sistema propuesto puede coadyuvar a resolver algunas de las carencias que los habitantes de altura sufren y que es posible que se agraven aún más dado el crecimiento de dichas poblaciones.

Se ha visto que el enriquecimiento del aire con oxígeno es válido, sin embargo, para aprovechar el sistema de manera integral, se presentan otras alternativas como la recirculación del aire a través del cultivo de microalgas para mejorar la calidad del aire interior.

Aunque no se logren incrementos suficientes de oxígeno, con esto se logrará que el bióxido de carbono producido por la respiración y/o por niveles altos en la atmósfera será totalmente consumido por el cultivo y el aire de renovación hacia los ambientes será totalmente limpio.

Por otra parte, se plantea la implementación del sistema completo en una industria que presente altos grados de contaminación atmosférica, de tal manera que se pueda utilizar el sistema de forma totalmente integral.

En cualquier caso es innegable que las microalgas son tan versátiles que su cultivo puede ofrecer ventajas inigualables a cualquier población pero especialmente a las poblaciones ubicadas en zonas de altura ya que estas podrían beneficiarse de la capacidad nutritiva de la biomasa algal así como de la posibilidad de producir biocarburantes, todo esto, con la ventaja adicional de depurar la contaminación ambiental.

Abstract

Indoor air quality is associated with the purity of exterior air, which may be contaminated to various degrees depending on the environment and other local factors such as wind or other possible sources of pollution. In cities or settlements at high altitudes, the quality of exterior air is further compounded by the relative lack of oxygen; therefore the air quality in high altitude may not be limited to the degree of pollution of the atmosphere but should relate it to the amount of oxygen therein.

Because the atmospheric pressure decreases with altitude increase, the amount of oxygen at high altitude is significantly lower than at sea level and this means that the human body faces a certain degree of metabolic stress in order to maintain its normal functions.

Recent studies have shown important physiological differences between i) indigenous populations, that have lived in these conditions for generations, ii) lifelong highland residents (only first generation) and iii) acclimatized newcomers. In all these groups, the organisms are exposed to a similar degree of hypoxxygenation (reduced oxygen concentration), and for all these individuals exposure to an indoor atmosphere enriched with oxygen can improve comfort and even prevent diseases that occur as a consequence of living in these habitats.

In nature, all oxygen in the atmosphere is constantly being produced through the process of plant photosynthesis and algae are a very important part of the oxygen-generating ecosystem. These organisms are currently being studied for their efficiency in the production of biomass, which can be used as a possible source of renewable energy, nutritional source or medical products. In addition, they are increasingly seen as environmental purification agents because they are able to use the carbon dioxide in the atmosphere and they also can grow and develop in human or industrial waste.

Taking into account the fact that at high altitude vegetation is sparse, this project studies the possibility of improving indoor air quality through enriching it by biogenic oxygen production by microalgae. The project also assesses the possible uses of biomass and the potential resulting environmental benefit. To provide perspective and detailed information about the current level of knowledge about this topic, an extensive literature review was performed both on the different aspects relating to the cultivation of microalgae and on defining various aspects describing the comfort and welfare of human beings in high altitude areas.

Assuming the percentage of oxygen required for an oxygen enrichment of the air, based on calculations of air renewal, we have determined the amount of oxygen needed to enrich the indoor air of a school in the city of La Paz, Bolivia.

From these data and correlating with the information found in the specialized literature, it was calculated the culture volume of microalgae that would be required to produce, through photosynthetic activity, the necessary amount of oxygen to replenish and maintain the increased the enriched environment.

Although the resulting volume of photobioreactors is too large to implement it, there is little doubt that the proposed system can help alleviate at least some of the shortcomings that people at high altitude suffer, shortcomings that are likely to escalate with the increase in number and density of these populations.

The approach described in this study could also be developed in alternative ways, through the use of the system in an integrated manner, such that a certain level of oxygen enrichment results from the repeated recirculation of air across the microalgae culture.

The system described here could also benefit from an increase in the scale of implementation though its use in an industrial environment that produces higher levels of atmospheric pollution. Such industries would benefit from providing the means to absorb the excess carbon dioxide while producing increased levels of oxygen. One potential advantage of an industrial setup is the possibility of constructing and using the large bioreactors required by these processes.

One of the highlights of this project is the realization that the microalgae are extremely versatile and their cultivation can offer certain clear benefits to several types of human populations, but especially to those living in high altitude areas as microalgae can not only improve the quality of air and reduce pollution, but can also provide nutritional support and even used as biofuels.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la Universidad Autónoma Metropolitana, me siento honrada de pertenecer a la comunidad de esta gran casa de enseñanza.

También quiero agradecer a CONACyT, ya que, sin el valioso apoyo brindado por esta institución, no hubiera sido posible el presente trabajo ni todo el aprendizaje logrado.

De manera especial quiero agradecer a mi tutora la Dra. Marcia Morales Ibarria, quien con una paciencia infinita me ayudo a enfocarme y no permitió que me perdiera en el laberinto de una investigación realizada en un área totalmente nueva y fascinante para mí. Sus comentarios, siempre acertados, guiaron desde el principio mis pasos y sin su apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

Quiero agradecer a mi cotutora, Dra. Esperanza García López, quien desde el principio creyó y se involucró en el proyecto además de confiar en mí, agradezco todo su apoyo y su amistad. También quiero agradecer al Dr. Hermilo Salas, Dr. Manuel Gordon y Dr. José García Chávez por los comentarios que me dieron y que sin duda ayudaron a mejorar este trabajo.

Agradezco a mi padre y a mi madre que con su amor sembraron la base para ser quien soy y para creer en mí, a mis hermanas Verónica, Lillian y mi hermano Juan Cristóbal, cómplices en todos los momentos de mi vida, a mis sobrinos que llenaron mi vida, a mi cuñado Emil por su paciencia a la hora de explicarme lo básico de la fisiología humana y por toda su ayuda, agradezco el amor incondicional de todos ellos y todo el apoyo que me brindan siempre.

Quiero agradecer a todos mis compañeros de Especialización y Maestría, quienes hicieron que esta aventura en México fuera más completa. Especialmente quiero agradecer a Ceci, Alex y Gloria, su amistad y su cariño son esenciales en mi vida. También a Adrian, Ma. Virginia y Caroline, les agradezco el brindarme apoyo en momentos especiales. A Giselle y Alex por ayudarme con algunas imágenes del documento.

Agradezco profundamente a todos mis amigos y amigas, a las que dejé en Bolivia y a los que me recibieron en México, especialmente a Angélica, Rodrigo, Víctor, Sergio, Paco y a todos los amigos que están regados por el mundo entero, haciendo de él un lugar más luminoso.

A todos, GRACIAS.

Índice

1

1.- Introducción	13
1.1.- Estructura de la tesis	14

2

2.- Vida en la Altura	19
2.1.- Historia	19
2.2.- Sistema respiratorio, anatomía y fisiología	23
2.3.- Síntomas de mal de altura agudo	28
2.4.- Vida en la altura a largo plazo	29
2.6.1 Confort olfativo	47

3

3. Confort	34
3.1.- Tipos de Confort	37
3.2.- Confort Térmico	38
3.3 Confort Acústico	42
3.4 Confort Lumínico	44
3.5 Confort Psicológico	46
3.6 Confort Respiratorio	47
3.6.2 Calidad del aire	48
3.6.2.1 Contaminación ambiental	49
3.6.2.2 Cantidad de oxígeno	50

4

4.- Altitud	54
4.1.- La Atmósfera	54
4.2.- Historia	54
4.3.- Composición de la Atmósfera	58
4.4.- Presión atmosférica.-	62
4.6.- Composición del Aire	66

5

5.- Las algas	70
5.1- Definición	71
5.2.- Reproducción y ciclos de vida	71
5.3.- Clasificación	73

5.4.- Hábitat	76
5.5.- Fotosíntesis	86
5.6.- Usos de las algas	92

6

6.- Producción de Oxígeno Biogénico	101
6.1 Antecedentes Históricos	101
6.2.1-Lagunas Abiertas	107
6.2.2- Fotobiorreactores	109
6.2.-Cultivo de Microalgas	107
6.3.- Mediciones de oxígeno	115

7

7.- Mejorar la calidad del aire en Altura	118
7.1.- Relación entre la Presión de O ₂ , la altitud y el confort.	119
7.2.- Adecuaciones de diseño arquitectónico y construcción	127
7.2.- Utilización de O ₂ biogénico: Producción de O ₂ Cálculos y volúmenes de fotobiorreactores	128
7.4.- Caso de Estudio	
Aplicación a una escuela de La Paz, Bolivia	135
7.5.- Enriquecer el aire con O ₂ obtenido de la atmósfera	140
7.6.- Alternativas de uso del sistema	140
7.6.1 Mejorar la calidad de aire en interiores	140
7.6.2 Capturar el CO ₂ industrial	142

8

8.- Discusión	146
---------------	-----

9

9.- Conclusiones	152
------------------	-----

A

Anexos	170
--------	-----

B

Bibliografía	154
--------------	-----

G

Glosario	164
-----------------	-----

Capítulo 1

1.- Introducción

La arquitectura tiene como uno de sus objetivos principales el de asegurar el confort del ser humano en relación al entorno en el que reside y lleva a cabo todas sus actividades, es decir que una de las funciones principales de la arquitectura es la de articular la relación del habitante del espacio interior con las condiciones del medio que lo rodea de forma que, el arquitecto, debe necesariamente mediar entre el espacio interior y el medio exterior para lograr el mayor confort posible para los habitantes, procurando al mismo tiempo mantener un equilibrio con el medio ambiente

A lo largo de la historia, se han desarrollado innumerables formas de articular esta relación, misma que ha estado especialmente marcada por el clima, los recursos que el entorno provee, la seguridad del sitio, sus características topográficas y otros aspectos que influyen en el quehacer arquitectónico.

El presente trabajo se enfocará en un tipo de confort específico que no está directamente relacionado con el clima del lugar ni con los otros aspectos mencionados sino que está relacionado con la altitud en la que se asientan algunas ciudades, la misma que puede influir negativamente sobre el bienestar de las personas que las habitan.

Este enfoque está relacionado con el hecho personal de haber vivido por muchos años en una de las ciudades más altas del mundo, la ciudad de La Paz, Bolivia ubicada a una altitud de 3650 msnm y haber sufrido en persona las consecuencias de la vida en altura, lo que ha provocado el deseo de plantear una alternativa a un problema: la escasez de oxígeno en zonas de altura.

Más allá de proponerse resolver el problema, el objetivo es articularlo con el hecho de que la altura no solo afecta a los seres humanos sino también a todos los seres vivos como las plantas y los animales por lo que la variedad tanto de flora como de fauna en estas zonas también se ve afectada con la consiguiente falta de recursos tanto energéticos como nutricionales para el ser humano.

Dado que el problema principal es la falta de oxígeno en el ambiente, el objetivo principal del presente trabajo es investigar sobre las consecuencias en el bienestar y la salud del ser humano, las características de la atmósfera de las zonas de altura, la búsqueda de una solución a esta carencia.

Por otra parte, se sabe que han sido las microalgas y las cianobacterias, las que crearon hace millones de años nuestra atmósfera y que, junto con las plantas mantienen el equilibrio y la posibilidad de vida en el planeta.

Actualmente estos microorganismos están siendo ampliamente investigados por el gran aporte que significan para el planeta y la humanidad porque, por una parte, gracias a su capacidad fotosintética, son organismos capaces de metabolizar el bióxido de carbono y el agua para crear diversos nutrientes,

mientras ceden oxígeno a la atmósfera y por otra parte porque está demostrado que tienen un gran potencial para dar solución a varios problemas ambientales como son la depuración de la atmósfera y de las aguas negras.

Así pues, se trata de dar solución a la falta de oxígeno que se presenta como una consecuencia de la altitud pero también de ver la factibilidad de utilizar oxígeno biogénico, es decir el oxígeno producido por organismos fotosintéticos, en este caso las microalgas, las mismas que pueden ser cultivadas con otros objetivos totalmente independientes a la calidad del aire en la altura, como es la obtención de biomasa para la producción de nutrientes o energéticos alternativos en zonas que pueden llegar a ser muy áridas precisamente por la altitud en la que se encuentran.

1.1.- Estructura de la tesis

Para ordenar y lograr abarcar en la investigación los diferentes aspectos que forman parte de este trabajo se ha estructurado en dos pilares principales.

El primero parte de la base que el ser humano merece vivir en las mejores condiciones posibles, en cualquier lugar del planeta en que se encuentre al margen de las condiciones atmosféricas, climáticas, geológicas o topográficas. Dado que el trabajo plantea la mejora del aire en zonas de altura, se analizan los factores que influyen en el bienestar del habitante de zonas de altura, y específicamente en el habitante de La Paz, Bolivia.

El segundo forma parte de la solución que se pretende dar y dado que está relacionado con la producción de oxígeno biogénico, se enfoca en abarcar todo lo relacionado con el cultivo de las microalgas, la producción de oxígeno (O_2) y la captura del mismo para utilizarlo en el enriquecimiento del aire.

Sin embargo, una parte importante de los aspectos abordados para el presente trabajo no están relacionados con conocimientos previos, por lo que se investigó sobre cada tema, por separado y por etapas, enfocando la atención en cada fase para comprender la información necesaria para cada uno de los pilares del trabajo. En primer lugar se seleccionó una serie de literatura relacionada con los diferentes temas y se la clasificó de tal forma que se pudiera acceder a cada tema de manera ordenada para abarcar lo más significativo del mismo, una vez leído el material y ya en etapa de la redacción se volvieron a seleccionar, se buscaron y analizaron más textos en especial artículos y literatura actualizada seleccionando la información y los datos que se requerían y detallándolos en los cuadros que se presentan anexos al trabajo.

Por otra parte, dado el carácter interdisciplinario del trabajo, en todo momento se contó con el apoyo de especialistas en las diferentes áreas que aportaron con su conocimiento y discernimiento y que se tradujo

en una mayor comprensión y una mayor profundización de cada tema, de tal manera que cada capítulo, aporta información específica pero a la vez va tejiendo la estructura del conjunto.

En la siguiente ilustración se muestra este esquema de aproximación tanto al problema planteado como a la solución del mismo, imitando un paño de "patchwork"¹, en el que se añadieron conocimientos de distintas especialidades para crear paso a paso el conocimiento necesario y formular una propuesta como solución al problema planteado.



Ilustración 1.- Esquema general del trabajo propuesto. (Elaboración propia)

¹ Patchwork: Se dice de la costura tradicional de algunas culturas anglosajonas en la que se unen varios retazos de diferentes telas, colores y formas para hacer un paño más grande, tradicionalmente utilizadas como colchas, edredones o abrigos.

Los capítulos que forman parte del análisis relacionado específicamente con el Ser humano se inician con el segundo capítulo, llamado La Vida en Altura, en el que se hace un análisis sobre las consecuencias fisiológicas que la vida en altura tiene sobre éste. El comprender la fisiología del ser humano nos ayuda a conocer los mecanismos involucrados en la respiración, la captura de oxígeno en la sangre y la relación e intercambio de los dos gases primordiales para la vida como son el oxígeno y el bióxido de carbono tanto a nivel alveolar como a nivel tisular.

También se estudia la forma en la que un desequilibrio en este intercambio gaseoso afecta a la salud a nivel de los diferentes órganos y sistemas que conforman el cuerpo humano y en cómo, a raíz de la carencia de oxígeno, el ser humano puede padecer diversos síntomas que pueden tener efectos de carácter muy leve y poco significativo hasta efectos muy graves que podrían provocar la muerte.

El tercer capítulo aborda lo relacionado con el bienestar y el confort del ser humano desde todos los aspectos que actualmente se estudian. Dado que el objetivo es lograr que el ser humano se encuentre en las mejores condiciones posibles de confort, se incluye el confort respiratorio para zonas de altura, entendido desde la perspectiva de que el aire que se respira no sólo debe ser limpio y contar con todas las condiciones de sanidad necesarias sino que además, debe contar con una cantidad de oxígeno suficiente para evitar cualquier desequilibrio fisiológico que provoque ya sea incomodidad a corto plazo o enfermedad a corto o largo plazo.

El cuarto y último capítulo relacionado con el ser humano tiene como objetivo principal el acercarnos a un conocimiento más profundo de la atmósfera y de las razones por las cuales ésta cambia a medida que se incrementa la altitud. Después de una pequeña reseña histórica de la formación de la atmósfera se analiza la presión atmosférica y la densidad del oxígeno a diferentes altitudes para conocer las razones que determinan que el aire en la altitud contenga menos oxígeno que el de la atmósfera a nivel del mar.

Tomando en cuenta que actualmente hay muchas ciudades o poblaciones que están asentadas por encima de los 2500 msnm y que casi todas presentan un crecimiento continuo, se considera importante proponer una mejoría en la calidad de vida de una población creciente que actualmente ronda los 140 millones de personas.

La parte correspondiente al análisis de las microalgas se concentra en el quinto capítulo en el cual se detallan los aspectos más importantes sobre las características de las microalgas y la capacidad fotosintética de las mismas. Así mismo se analiza la tecnología más actualizada para el cultivo de las microalgas a gran escala para producir desde nutrientes hasta energéticos y otros usos que se dan a la biomasa derivada de estos cultivos.

A continuación se presenta una sección de cálculos, la cual tiene como objetivo, por un lado determinar el grado de enriquecimiento del aire necesario de acuerdo a la altitud, así como el cálculo que nos permita aproximarnos a un volumen de biomasa adecuado para analizar la factibilidad de producir el oxígeno *in situ*. Para ello, se elaboró una hoja de cálculo, en la cual solo se deben introducir algunos datos básicos para poder lograr un resultado tanto para el enriquecimiento de oxígeno requerido como para el volumen de cultivo de microalgas necesario.

Aunque el mencionado programa se puede utilizar para cualquier altitud y puede aplicarse a cualquier caso específico, en el presente trabajo se enfoca en la Ciudad de La Paz, Bolivia ubicada a 3650 msnm por lo que todos los ejemplos de enriquecimiento de aire interior hacen referencia a la mencionada ciudad.

Posteriormente se presenta el caso de estudio donde, con base a los cálculos se analiza la posibilidad del enriquecimiento *in situ*, como sistema de producción de oxígeno y se presentan, tomando como ejemplo una escuela ubicada en la Ciudad de La Paz, los cálculos completos así como algunas propuestas de diseño de fotobiorreactores.

Finalmente se hace una reflexión acerca de la propuesta, de otras alternativas posibles y del interés a nivel mundial que existe en cuanto al uso de sistemas de microalgas y se plantean las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 2

2.- Vida en la Altura

Como sabemos, el oxígeno es vital para todos los seres vivos incluyendo a los seres humanos, el oxígeno es el elemento que mantiene la vida, y es tan importante que mientras las personas son perfectamente capaces de mantenerse vivas durante varios días sin comer e incluso sin tomar agua, no pueden aguantar más de tres o cuatro minutos sin oxígeno. Esto se debe a que el cuerpo humano tiene medios para transformar los materiales de reserva (grasas) en alimento y suficiente líquido para mantener activas las funciones vitales durante un período de tiempo o en caso de riesgo. Sin embargo el cuerpo humano no cuenta con ningún sistema de acumulación de oxígeno por lo que necesita recibirlo de manera constante desde el medio ambiente. Como se ha verá en el capítulo correspondiente a la atmósfera, aunque en cualquier parte del planeta hay una atmósfera que soporta la vida, en zonas de altura el aire es mucho menos denso, lo que tiene consecuencias en el confort humano tanto a corto como a largo plazo.

En el mismo se profundizará sobre la fisiología humana relacionada con la vida en zonas de altura, se analiza someramente la historia de las enfermedades relacionadas con ésta y se muestran cuales son las consecuencias de vivir sobre los 2500 msnm, que es la altitud a partir de la cual los síntomas se ven agravados en mayor porcentaje. El carácter de este capítulo es puramente informativo y no pretende profundizar en temas de investigación médica que están totalmente fuera del alcance del trabajo.

2.1.- Historia

Se sabe que sin respirar es imposible vivir, aunque durante gran parte de la historia de la humanidad no era muy claro que el aire contenía la sustancia vital que el ser humano necesitaba para la vida. Aún así, trató de describir tanto la trayectoria que esta sustancia recorría dentro del cuerpo humano, así como la diferencia entre los distintos "tipos de aire" con que se encontraba en el mar, en alta mar, en el desierto e incluso en las altas montañas. Aún así, se necesitó de mucho tiempo para conocer la verdadera composición del aire y las características de las sustancias que contiene y que, a través de la respiración, mantiene vivos a los seres humanos y a todos los seres del planeta.

Gracias a la fascinación especial que la raza humana siempre ha sentido por conquistar las cimas más altas y peligrosas del planeta, hay literatura que demuestra que desde hace miles de años se conoce que el aire de las montañas tenía efectos especiales sobre los seres humanos, de hecho las primeras crónicas de excursiones a zonas de altura y del aire que se respiraba en las mismas, se remontan hasta hace cerca de dos mil años, como lo demuestra la siguiente cita de un texto escrito por el misionero budista Fa- Hsien (334 – 420 DC), mientras cruzaba un paso a una altura entre 3600 y 4300 msnm:

....En ellas (las montañas) se acumula la nieve tanto en invierno como en verano, en el lado norte de la montaña, en la sombra, repentinamente se encontraron con un viento helado que los hizo temblar y no les permitía hablar, Hwuy- Ring no podía continuar más allá, una espuma blanca salía de su boca y dijo: Yo no puedo seguir viviendo, vete inmediatamente, para que no muramos todos aquí, y diciendo esto, murió”² (Houston, 2001)

Mucho más cerca a nosotros, existen crónicas de las diferencias en el aire por causa de la altura, que datan de los años de la colonia cuando, durante las expediciones que siguieron al descubrimiento de América, los jesuitas estaban encargados tanto de evangelizar como de realizar descripciones fidedignas de todo aquello que veían, ya sea en referencia a las costumbres de los habitantes y a su cultura o al medio que los rodeaba, tan diferente de España. Este es el caso del siguiente pasaje escrito por el Padre José Acosta a su paso por el Nevado Pariacaca en Perú, que refiriéndose a la calidad de aire dice:

“...He querido decir todo esto para declarar un efecto extraño que hace en ciertas tierras de Indias el aire o el viento que corre que es marearse a los hombres con él, no menos fino, mucho más que en la mar. Algunos los tienen por fábula y otros que es enrarecimiento esto, yo diré lo que pasó por mí. Hay en el Perú una tierra altísima que llaman Pariacaca....iba yo preparado lo mejor que pude según los documentos que daban allá... Y con toda preparación, cuando subí las escaleras, que llaman, que es lo más alto de esta tierra, cuasi súbito me dio una congoja tan mortal que estuve con pensamientos de arrojarme de la cabalgadura en el suelo...Finalmente digo que si aquello durara entendiera ser cierto el morir, mas no duró sino tres o cuatro horas hasta que bajamos bien abajo y llegamos a temple más conveniente, donde todos los compañeros, que serían catorce o quince estaban muy fatigados, algunos pedían confesión... Y no es solamente este paso de la tierra Pariacaca el que hace este efecto, sino toda aquella cordillera que corre por más de quinientas leguas y por doquiera que se pase... Porque el aire es tan sutil y penetrativo que pasa las entrañas y no solo los hombres la sienten sino también las bestias que a veces se encalman y no hay espuelas que basten para moverlas... Tengo para mí que aquel paraje es uno de los más altos del mundo, porque es cosa inmensa lo que sube, que a mi parecer los puertos nevados de España, los Pirineos y los Alpes de Italia son casas ordinarias respecto de torres altas y así me persuado que el elemento del aire allá está tan sutil y delicado que no se proporciona a la respiración humana, que la requiere más gruesa y más templada...” (Acosta, 1590)³

Aunque la descripción es más larga y más detallada se quiso rescatar solo parte de la misma ya que es suficiente para mostrar cuál fue el impacto para los españoles al llegar a la Cordillera de los Andes y como se vieron afectados no solo en los pasos más altos de las montañas sino incluso en las zonas relativamente bajas como la estación de reposo a la que hace referencia. La descripción resulta interesante además por la mención que hace a los animales, los cuales se veían tan afectados como los humanos por la gran altitud del lugar.

Así que algo en el aire era responsable de lo que le pasaba a la gente y quedaba claro que afectaba más a los extranjeros que a los nativos y se pensaba que estaba relacionada con el aire tan frío que se

² Traducción realizada por la autora del texto en inglés correspondiente a la cita

³ Por ser algo largo, no se ha incluido todo el texto, el mismo se puede encontrar completo en la página 145 del libro citado.

percibía en el entorno y con el esfuerzo físico que estos realizaban. Todos los cronistas se daban cuenta de la sutilidad del aire a medida que ascendían a la montaña pero ninguno de ellos podía explicar cómo se relacionaba esto con el cuerpo humano.

Alrededor de la década de los sesenta en el siglo XX, después de la segunda guerra mundial se iniciaron varias investigaciones relacionadas con el desempeño del ser humano en condiciones de altura y se determinó que a medida que se subía, los efectos de la altura parecían aún más agudos, se notaron dificultades en las personas para resolver una serie de pruebas psicológicas sencillas a una altitud de unos 4600⁴ msnm, y en alturas de 5300 msnm o más, estas dificultades fueron aún más marcadas. (Poulton, 1970)

Si bien en un principio se había asumido que los efectos nocivos de la altitud se iniciaban a una altura de aproximadamente 3000 msnm, existen registros donde se han detectado afecciones incluso a una altitud de 1600 msnm aproximadamente⁵ (Poulton, 1970), En el presente trabajo se asume como el límite de confort una altitud de 2500 msnm, ya que a partir de ésta pueden aparecer los síntomas negativos en un mayor número de personas.

Desde un análisis porcentual, el aire siempre contendrá aproximadamente un 21 % oxígeno, a cualquier altura y en cualquier parte del planeta, sin embargo, como se verá en el capítulo correspondiente a la Altitud, dada la reducción de la presión atmosférica a medida que la altitud se incrementa, la densidad del aire decrece por lo que la cantidad de oxígeno efectiva por m³ de aire se reduce a mayores altitudes.

Por otra parte, nuestro organismo acondiciona el aire que ingresa en nuestro sistema respiratorio para que pueda llegar en condiciones óptimas hasta los pulmones lo que provoca un cambio en las condiciones de temperatura y humedad del aire y eso determina, a su vez, que la presión parcial del aire a nivel alveolar sea 47 mmHg menor que la presión parcial exterior, fenómeno que ocurre a cualquier altitud.

Por todos estos motivos, es muy importante no solo conocer la presión del aire exterior sino también la presión parcial de O₂ en el aire, así como la presión alveolar de O₂ (P_{AO2}) ya que en última instancia de ésta dependerá el intercambio adecuado de los gases dentro del organismo. Como ejemplo de lo anteriormente expuesto, en la ilustración 2 se ha esquematizado la P_{AO2} en función de la altitud.

⁴ En el original aparece en pies, para mayor facilidad en la lectura se han redondeado las cantidades y se las ha convertido a metros.

⁵ Unos 5000 pies

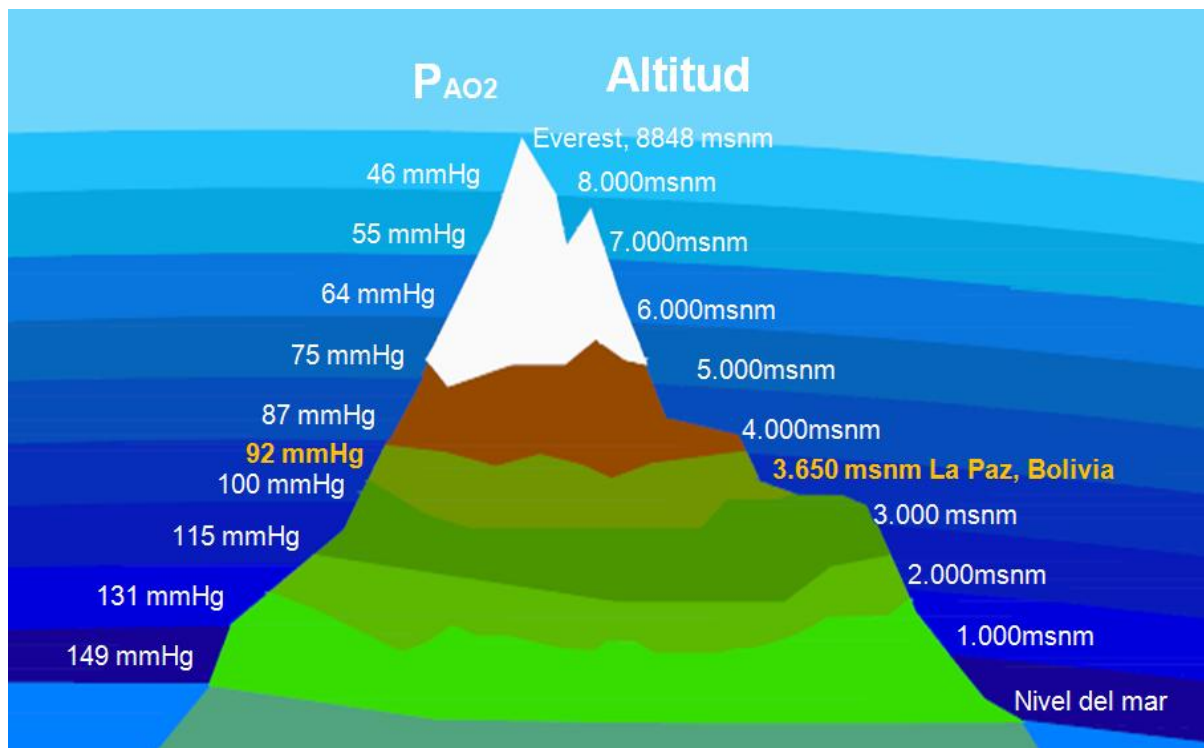


Ilustración 2.- Presión de O_2 inhalado y saturado según la altitud. Elaboración propia basada en (Wagner, 2001).

Una buena oxigenación no solamente permite mantenernos vivos, sino que beneficia a la salud en general. La falta de oxigenación, en cambio, pone al organismo en estrés y los síntomas del mal de altura pueden variar de leves a muy peligrosos dependiendo de la capacidad de adaptación de la persona.

Dado que el cuerpo humano no puede almacenar oxígeno, es necesario abastecer las células con una cantidad regular en cada respiración. A medida que el oxígeno es absorbido por la sangre, el bióxido de carbono es eliminado como producto de desecho del metabolismo, regresando a los pulmones a través de la sangre y exhalado fuera del cuerpo por las vías respiratorias.

Por todos estos motivos, es necesario adentrarnos un poco en la fisiología de altura para poder entender la mecánica de la respiración, los cambios que en ésta se dan y en cómo afecta la altitud no solo al sistema respiratorio si no a todo el organismo en general.

A continuación se explican las razones por las cuales se presentan los diferentes síntomas y si el cuerpo humano es capaz de aclimatarse completamente a esta circunstancia de vida a largo plazo. Si bien muchos de los estudios realizados y consultados para el presente trabajo se han realizado en condiciones de hipoxia aguda en personas aficionadas al montañismo, se intentará dilucidar cuáles de los síntomas y las patologías afectan al habitante de zonas de altura a largo plazo o si es posible para el ser humano adaptarse totalmente en la altura, sin que su organismo esté sometido a un estrés específico.

2.2.- Sistema respiratorio, anatomía y fisiología

Sabemos que hay ciertas funciones del cuerpo humano que se ven afectadas por la calidad del aire; aquí se intenta responder a preguntas como cuáles son estas funciones, cómo y porqué se ven afectadas y por cuánto tiempo afectan a la salud.

Para tal efecto, empezaremos a conocer el sistema respiratorio que tiene como órganos principales los pulmones, los cuales tienen como función primordial la de capturar el oxígeno del aire para llevarlo a la sangre venosa y eliminar el bióxido de carbono de la misma para retirarlo al exterior. Los pulmones son, además, un gran depósito de sangre y tienen la capacidad de filtrar materiales tóxicos para que estos sean eliminados de la circulación además de metabolizar determinados compuestos (West, 1981).

El proceso de intercambio de gases es posible gracias al comportamiento de estos y específicamente a la ley de Boyle, según la cual, la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente, es decir a menor volumen, mayor presión y a mayor volumen, menor presión.

Si tomamos en cuenta que el recipiente son los pulmones, cuando estos se expanden hay mayor volumen de aire hacia el interior del cuerpo, por lo que la presión baja permitiendo que el aire de la atmósfera entre en los pulmones y cuando estos están llenos se contraen lo que a su vez provoca que la presión se incremente y por lo tanto el aire salga hacia la atmósfera.



Ilustración 3.- Mecánica de la respiración (Britannica, 2006)

El proceso de la respiración está determinado por el cuerpo carotideo, ubicado en las venas del cuello y formado por una serie de células nerviosas que al detectar un descenso de la presión de oxígeno en la sangre, activan la ventilación mandando señales a los músculos encargados de la mecánica respiratoria, es decir del movimiento del diafragma y los músculos intercostales. Para lograr capturar aire, (inspiración) el diafragma se contrae hacia arriba y los músculos se elevan, las costillas se ensanchan y la caja torácica se expande, permitiendo la entrada del aire. En la espiración, (exhalación), el diafragma se relaja, las costillas descienden, se desplazan al interior y la caja torácica disminuye su volumen provocando la salida del aire hacia el exterior. Estos movimientos permiten que el aire fluya por todas las vías respiratorias en ambos sentidos, para tener una idea más exacta del funcionamiento de este sistema, vamos a seguir el mismo recorrido que hace el aire para llegar a los pulmones en forma adecuada.

El sistema respiratorio tiene como órgano inicial las fosas nasales y la boca, por donde entra el aire y se dirige hacia el resto de las vías respiratorias. En la cavidad nasal, además de encontrarse con la mucosa amarilla, que está considerada como el órgano que permite el sentido del olfato, el aire se encuentra con una serie de elementos que lo van acondicionando para que se reciba en los pulmones, entre estos, se encuentran los cilios que capturan las partículas nocivas para el organismo a medida que el aire va ingresando por las fosas nasales. Por otra parte, están las mucosas que ayudan a purificarlo y lo humidifican al mismo tiempo que un sistema capilar complejo lo calienta hasta alcanzar la temperatura del cuerpo humano, usualmente a 37 grados. (Cerón, 2011)

Posteriormente, pasa a la faringe que es un conducto común para el aire y la comida y luego a la laringe a la que llega exclusivamente el aire gracias a la protección ejercida por la epiglotis. El aire continúa su recorrido dirigiéndose hacia la tráquea que en su extremo inferior se bifurca en dos tubos llamados bronquios, que penetran hacia el pulmón y ya en el interior de cada uno de estos, se van dividiendo en bronquiolos creando una red tubular conocida como vías aéreas de conducción que termina en los bronquiolos terminales y que tiene como única función la de transportar el aire hasta la zona respiratoria.

A partir de estos, las ramificaciones, que presentan alvéolos ocasionales, pasan a llamarse bronquiolos respiratorios que se ramifican en conductos alveolares llamados así por estar rodeados de alvéolos en casi toda su superficie, cada conducto respiratorio se ramifica en cinco o más conductos alveolares que contienen, en suma, millones de alvéolos y constituyen el mayor volumen del pulmón, (aproximadamente 3000 ml), esta zona es conocida como zona respiratoria pues es donde se realiza el intercambio hematogaseoso.

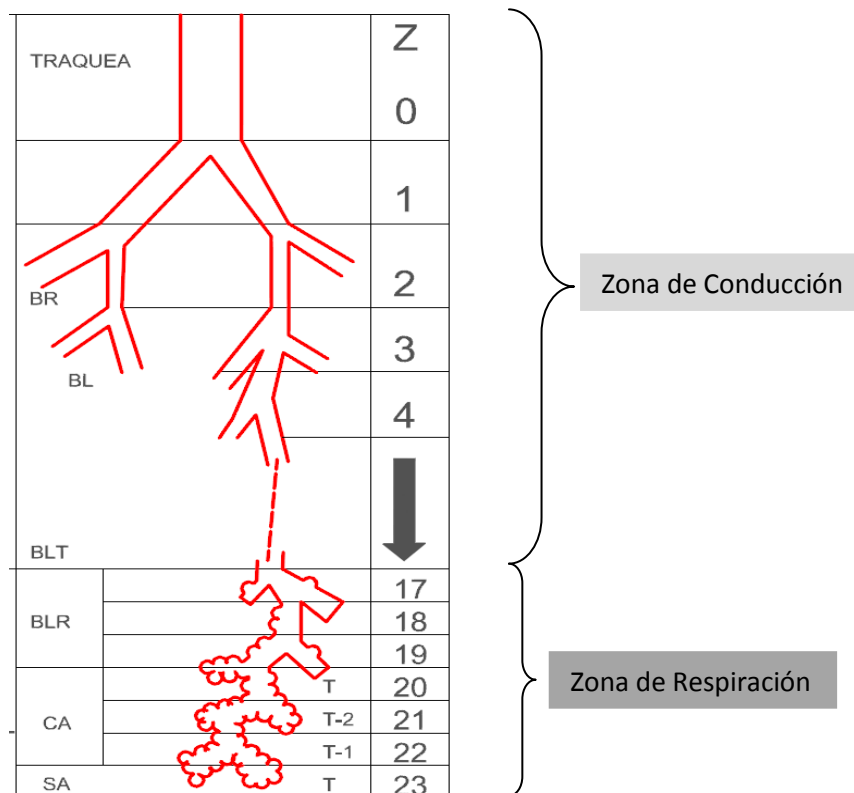


Ilustración 4.- Esquema de las vías aéreas humanas según Weibel⁶. Donde Z se refiere a las generaciones; BR: Bronquios, BL Bronquiolo; BLT: Bronquiolo terminal; BLR: Bronquiolo Respiratorio; CA: Conducto Alveolar; SA: Saco Alveolar

Es en este lugar, llamado barrera o membrana hematogaseosa donde se produce la entrada de oxígeno en la sangre, para lo cual el sistema circulatorio dentro del pulmón también forma una red de tubos ramificados desde la arteria pulmonar hasta los capilares y desde estos hasta las venas pulmonares. Cada capilar mide aproximadamente $10\mu\text{m}$, lo que permite el paso de un glóbulo rojo por vez, sin embargo, la red de capilares es tan densa alrededor de los alveolos que forma una lámina casi continua de sangre en la pared alveolar, es por eso que el intercambio gaseoso se realiza de una manera tan eficiente.

Ahora bien, para entender cómo pasan los gases a través de las paredes alveolares es necesario revisar la ley de difusión⁷ de Fick, según la cual, la transferencia de un gas es directamente proporcional a la superficie de difusión e inversamente proporcional a su espesor. Esto nos muestra que los pulmones son el lugar ideal para la difusión de los gases toda vez que la superficie de difusión dentro de los mismos se

⁶ Esquema obtenido en el libro de John B. West Fisiología Respiratoria, pag. 13, en el cual se cita como autor a Weibel, E.R, 1963. (West, 1981)

⁷ La difusión es el fenómeno según el cual los fluidos pasan de un sitio de mayor presión parcial hacia otro de menor presión parcial, es decir que se refiere a la tendencia de los mismos de equilibrarse.

calcula entre 50 y 100 m², mientras que el espesor de la barrera hematogaseosa, es de apenas 5 µm. Esta estructura pulmonar permite que la difusión del O₂ desde el alvéolo hacia la sangre sea casi inmediata en condiciones normales de presión de oxígeno (PO₂), como se puede apreciar en la siguiente ilustración. (Ver Ilustración 5)

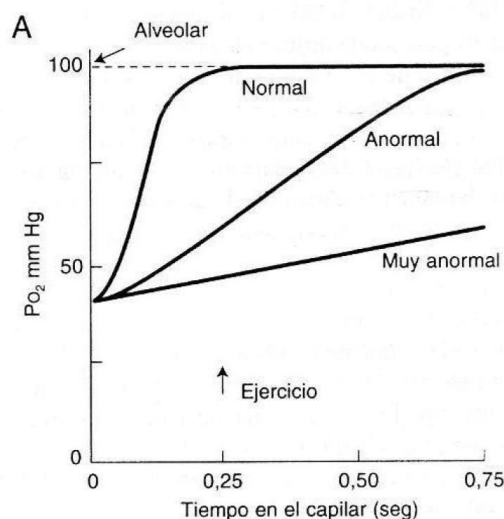


Ilustración 5.- Tiempo que el oxígeno tarda en recorrer el capilar en condiciones de presión de oxígeno normales (PO₂) (West, 1981), como se aprecia, el O₂ tarda apenas 0.25 segundos en traspasar la pared capilar.

Ahora que ya se ha explicado cómo el oxígeno llega a los alvéolos y se difunde en la sangre, es importante comprender como sucede la transferencia de O₂ hacia los tejidos, lo que se explicará de forma muy breve.

De todo el oxígeno encontrado en la sangre, apenas un porcentaje muy pequeño se encuentra disuelto en ésta, el resto se transporta gracias a la combinación de éste con la Hemoglobina (Hb). La hemoglobina cargada de oxígeno forma la oxihemoglobina, (O₂+Hb= HBO₂) y la que ya ha transferido el O₂ en los tejidos se conoce como desoxihemoglobina. La saturación de O₂ en la sangre se refiere a la cantidad de sitios de unión disponibles que el O₂ ha ocupado y que normalmente asciende a un 97,5% en la sangre arterial para una presión de 100 mmHg, mientras que para la sangre venosa mixta para una PO₂ de 40mmHg es de alrededor del 75%. Este cambio de PO₂ en la Hb implica, además, un cambio en la conformación de la célula, la forma oxigenada se conoce como el estado R(Relajado), mientras que la forma desoxi se conoce como el estado T (Tenso). (West, 1981).

La curva que muestra el nivel de saturación de la hemoglobina se llama curva de disociación de O₂ y se realiza manteniendo constante la temperatura, el pH y el CO₂. (Ver ilustración 6)

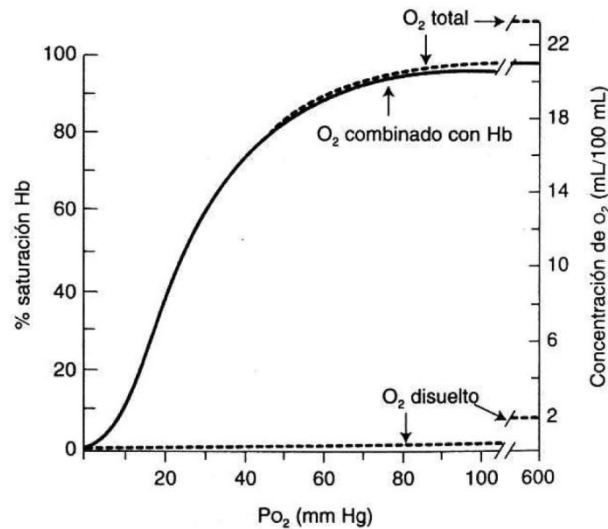


Ilustración 6.- Curva de disociación del O₂, (línea Continua), para un pH 7, 4; PCO₂ de 40 mmHg y 37°C de Temperatura. La concentración total de O₂ se muestra también para una concentración de hemoglobina de 15g/100mL de sangre.

La forma de la curva de disociación del O₂ conlleva ciertas ventajas fisiológicas (West, 1981), la porción aplanada implica que aunque la PO₂ del gas alveolar descienda algo, la carga sanguínea de O₂ se modificará muy poco, por otra parte siempre existirá una diferencia entre las presiones parciales del gas alveolar respecto a la sangre, a pesar de la gran transferencia de O₂ a la misma, en consecuencia el proceso de difusión se acelera; además, la parte inferior muy inclinada de la curva, implica que los tejidos periféricos pueden extraer grandes cantidades de O₂ y producir solo un pequeño descenso en la PO₂ capilar. El mantenimiento de la PO₂ sanguínea favorece la difusión de O₂ hacia las células de los tejidos. (West, 1981).

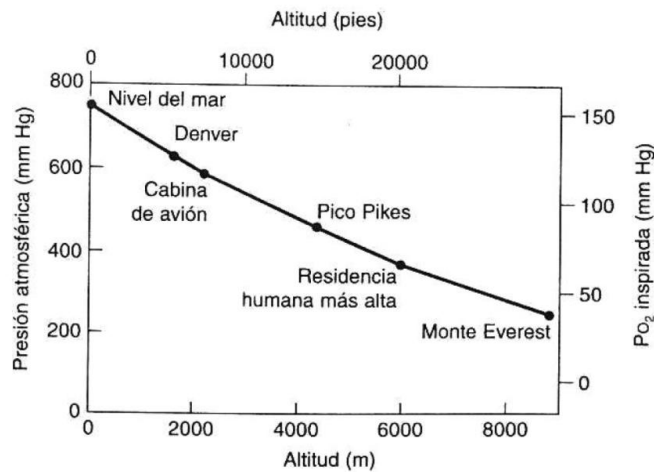


Ilustración 7.- Diferencias en las Presiones Atmosféricas e inhaladas a medida que se incrementa la altitud

Otro gas importante que influye en el equilibrio del sistema y se transporta por las mismas vías es el bióxido de carbono CO_2 , éste lo hace de tres maneras, aproximadamente un 10% se disuelve en la sangre ya que es mucho más soluble que el O_2 , otra parte lo hace en forma de bicarbonato y otra combinado con proteínas. El CO_2 es un producto del metabolismo celular y no profundizaremos en su análisis ya que no entra en los objetivos del presente trabajo, solo diremos que a menor saturación de O_2 en la Hb, mayor concentración de CO_2 para una misma P_{CO_2} y que las presiones de ambos gases en el circuito sanguíneo juegan un rol muy importante en el equilibrio respiratorio y metabólico del organismo.

Ambos gases se desplazan a través del sistema circulatorio y los tejidos por difusión simple, como sucede entre el alvéolo y los capilares pulmonares. Como el CO_2 se difunde con una rapidez de casi 20 veces mayor que el O_2 el paso del CO_2 de los tejidos a la sangre no es problema, en cambio para que el O_2 pueda llegar hasta el tejido debe haber una PO_2 mucho más alta en el capilar que en los tejidos de los cuales es importante decir que cada órgano responde a una necesidad particular de oxígeno por lo que cada uno tiene presiones diferentes de tal manera que recibe solo la cantidad que requiere.

Ahora bien, como se ha visto repetidamente, la presión atmosférica se reduce a medida que aumenta la altura, el ser humano tiene la capacidad de aclimatarse hasta cierto punto a estos cambios de presión pero el hecho de que la presión atmosférica descienda provoca el descenso de la PO_2 dentro del cuerpo humano lo cual no permite que este gas llegue a los tejidos con la celeridad que lo hace en condiciones normales y por consiguiente trae algunas consecuencias para la vida temporal o a largo plazo en altura que se revisarán a continuación.

2.3.-Síntomas de "mal de montaña agudo"

La altitud afecta a todos los seres vivos, incluidos los animales y las plantas por lo que en zonas de altura la actividad agraria es bastante reducida, limitándose casi por completo al cultivo de diferentes tubérculos y la cría de animales adaptados como los camélidos de los Andes (Alpaca, Llama, Vicuña) o al Yac del Himalaya. Este es un elemento a tomar en cuenta a la hora de analizar el nivel nutricional de la población más pobre de las zonas altas, así como el acceso a fuentes energéticas, como la madera.

En el ser humano la falta de oxígeno es identificada de inmediato por el organismo y todos los órganos y sistemas sufren con esta carencia, en especial el cerebro, es por eso que se activan mecanismos de defensa, como son el incremento de la ventilación; determinado por el cerebro que, tras recibir la alarma desde el cuerpo carotideo, manda impulsos a los músculos del tórax, incluyendo el diafragma. Estos músculos, responden con movimientos más frecuentes y más profundos, provocando una ventilación mayor en el individuo.

A pesar de los mecanismos de defensa que el organismo utiliza cuando es sometido a menores presiones alveolares de oxígeno (P_{AO_2}), la carencia de oxígeno en el ambiente tiene efectos que pueden ir desde muy ligeros y poco peligrosos hasta muy graves con peligro de muerte para el ser humano, dependiendo de muchos factores.

El síntoma conocido como *Mal de Montaña Agudo* (MMA) es el más común de todos y afecta aproximadamente al 35% de la población que visita un lugar de altura, en general agrupa ciertos síntomas característicos como son el dolor de cabeza, los mareos, palpitaciones, insomnio, pérdida del apetito y náuseas. Éste puede evolucionar ocasionando en un edema pulmonar, que puede resultar fatal por lo que es necesario identificar a los afectados y tomar medidas preventivas como la inhalación de O_2 al 100%, o si la situación fuera grave, el descenso inmediato a lugares más bajos sería lo más indicado. (Reeves & Weil, 1998).

2.4.-Vida en la altura a largo plazo

Lo que ocurre con el habitante aclimatado a la altura, el que vive por temporadas largas o permanentemente en este tipo de ambientes es más relevante para el presente trabajo dado que se trata de mejorar la calidad de vida de esta población en particular, y es posible que se pueda mejorar también las condiciones de los visitantes.

La mayor parte de la población que vive en altura está repartida en pocos lugares del planeta, la más antigua está en la de la zona del Tíbet que está poblada desde hace unos 25000 años, seguida por la población de los Andes centrales que, se asentó hace aproximadamente 12000 años, las más recientes son las que se encuentran en Colorado (EUA) con 300 años de antigüedad y la población de la etnia Han que reside en los Himalaya hace apenas 60 años (González & Tapia, 2007). También en México existen desde antes de la colonia poblaciones asentadas entre los 2500 y 3500 msnm especialmente en el valle Central de la Meseta de México desde aproximadamente el siglo VI, donde se han ido reproduciendo diferentes civilizaciones como los Toltecas, Chichimecas o posteriormente los Aztecas.

La adaptación de un organismo a un medio diferente a su hábitat u hostil implica que éste es capaz de mantenerse en buen estado de salud desarrollando actividades físicas y mentales, así como de reproducirse en condiciones óptimas tanto para la madre como para el recién nacido. De acuerdo a las investigaciones realizadas por científicos, las características de aclimatación varían dependiendo de varios factores y uno de los más relevantes es el tiempo de estancia de una población específica por varias generaciones en un lugar de altura. Otro factor importante, por lo tanto, es el nivel de mestizaje que puede haber en la población con personas que migran desde zonas más bajas. Para tener una perspectiva de la evolución de la adaptación a las grandes alturas es necesario estudiar las poblaciones que han permanecido en esas condiciones el tiempo más largo y con menor mezcla posible. De todas las

zonas de gran altitud, las poblaciones ubicadas en el Himalaya (Tíbet), son las que menor grado de mestizaje presentan y que más tiempo han residido en el mismo lugar por lo que son las que más se adecúan a ser investigadas para conocer mejor la capacidad de adaptación del ser humano a un entorno tan hostil. (Niermeyer et al., 2001)

En cualquier caso, encontrar individuos totalmente adaptados a la altitud es muy difícil en un mundo con índices tan altos de migración y un alto nivel de mestizaje, por lo que asumimos que las patologías relacionadas con la altitud, lejos de mitigar, afectarán cada vez a más seres humanos ya que a medida que pase el tiempo, los residentes de altura estarán menos adaptados a la misma y los problemas con los que se pueden encontrar pueden ser cada vez peores aunque varían según la edad, el sexo, la actividad física de cada persona e incluso los viajes a zonas más bajas. (Niermeyer et al., 2001).

Por ejemplo, en contra de lo que se creía, la capacidad reproductiva de las mujeres que viven en altitud es muy alta, similar a las que viven en zonas bajas, aunque se detectan características diferentes en las zonas de altura: la menarquía se presenta algo más tarde y la menopausia algo más temprano que al nivel del mar. Aunque la fertilidad no se ve más reducida que en zonas bajas, es importante tener en cuenta que el crecimiento intrauterino se retrasa. (Niermeyer et al., 2001).

Durante la gestación uno de los problemas más comunes que debe enfrentar la madre es la subida de la presión sanguínea y la hemoglobina que puede derivar en la pre-eclampsia y el retardo en el crecimiento intrauterino. (González & Tapia, 2007) La mortalidad infantil suele ser más alta en zonas de altura, así como la mortalidad materna (SIIC, 2002). Es probable que ésta sea la razón por la cual tanto las poblaciones andinas como las tibetanas presentan la costumbre de viajar a zonas más bajas durante los meses anteriores al alumbramiento en búsqueda de un alivio tanto para la madre como para el bebé. (Niermeyer et al., 2001).

Los recién nacidos tienen tendencia a presentar valores menores tanto en el peso como de tamaño. Este hecho se prolonga más allá de la niñez, llegando hasta la adolescencia aunque también el tiempo de crecimiento se alarga hasta aproximadamente los 22 años, aún así, la talla final suele ser menor que a nivel del mar, aunque puede que este resultado esté también asociado a la nutrición. (Niermeyer et al., 2001) (González & Tapia, 2007).

En los niños se reportan enfermedades relacionadas exclusivamente con la altitud, por ejemplo la incidencia del edema pulmonar en niños que regresan a la altura después de un viaje a tierras más bajas es muy alta; otras enfermedades como el raquitismo se reportan especialmente en zonas del Tíbet por la falta de exposición al sol de niños entre los 18 y los 35 meses. La poca saturación de oxígeno arterial, así como una disminución en la capacidad de realizar ejercicio tanto en niños como en adolescentes es común a todas las regiones estudiadas. (Niermeyer et al., 2001)

En numerosos estudios se han reportado un mayor desarrollo del tórax en personas que crecen en zonas de altura, a pesar de tener una talla reducida en general. Este hecho se presenta tanto en poblaciones andinas como en el Himalaya, aunque lo más importante, es que tanto los pulmones como la capacidad vital y el volumen residual son mayores en habitantes de zonas altas si se comparan con habitantes de zonas más bajas o habitantes con poco tiempo de residencia en la altitud.

El *Mal de Montaña Crónico* (MMC) es una de las enfermedades más comunes que afecta tanto a los residentes como a los que viven largas temporadas en la altitud. El MMC es una enfermedad que afecta a casi todas las poblaciones de zonas de altura, excepto a los Sherpas (Tíbet). Tanto los hombres como las mujeres se ven afectados por este mal pero existe mayor incidencia en los varones, los síntomas incluyen la cefalea, mareos, somnolencia, y alteraciones de la memoria. El ascenso de la presión arterial pulmonar es típico y hay descenso en la saturación de la oxihemoglobina, es decir de la hemoglobina que se encarga de transportar el oxígeno. (Niermeyer et al., 2001). Los síntomas pueden variar en diferentes niveles de policitemia, fatiga crónica, poca o nula tolerancia al ejercicio e hipoxemia severa. (West, 1981)

La policitemia es un aumento de los glóbulos rojos en la sangre, usualmente se presenta en personas que viven durante mucho tiempo en zonas de altura y se produce como una respuesta natural a la falta de oxígeno. La hipoxemia induce a los riñones a producir cierta hormona que su vez estimula en la médula ósea la producción de hemoglobina, de tal manera que se incremente la cantidad de glóbulos rojos y por lo tanto el transporte de oxígeno. Significa que aún cuando la PO_2 arterial y la saturación de O_2 estén disminuidas, la concentración de O_2 en la sangre puede ser normal y en algunos casos incluso mayor que la normal. (West, 1981). Hasta hace poco tiempo ésta era considerada una de las formas que el organismo tenía para defenderse de la carencia de oxígeno pero actualmente se sabe que la policitemia trae como consecuencia un aumento de la viscosidad de la sangre que puede llegar a ser sumamente nociva, por lo que a partir de ciertos niveles, es considerada una patología grave de zonas de altura.

En este sentido se sabe por ejemplo que los nativos del Himalaya que han residido más que ninguna otra población en la altura no presentan síntomas de policitemia o de MMC, esto demostraría la hipótesis de Wislow y Monge citados por (González & Tapia, 2007) de que la policitemia y la eritrocitosis excesiva no son útiles para la adaptación a la altura.

Residir durante mucho tiempo en zonas de altura puede tener consecuencias crónicas desde suaves hasta muy severas, la adaptación a estas zonas solo se logra a través de muchas generaciones, ya que al parecer es un proceso que va asociado a cambios hormonales que se van sucediendo generación tras generación aunque aún no se conoce del todo.

Según (González & Tapia, 2007), las poblaciones con niveles de testosterona en el rango normal bajo estarían asociadas a menores niveles de hemoglobina y por lo tanto una mayor adaptación a la altura mientras que poblaciones con un nivel alto de testosterona se asocian a un mayor nivel de hemoglobina, menor adaptación, mayor riesgo de contraer el MMC, así como un alto riesgo reproductivo.

Como se ha visto, la hipoxia afecta al ser humano desde su nacimiento y durante toda su vida, exceptuando a las poblaciones que se han adaptado a través de varias generaciones y que no presentan mestizaje alguno, lo cual actualmente es prácticamente imposible en la mayoría de las ciudades o los asentamientos humanos.

Dado que cada vez es menos probable encontrar una población de zonas de altura que no presente mestizaje durante varias generaciones, se asume que en cualquier circunstancia es adecuado plantear una solución a la carencia de O_2 , en cualquier parte del planeta pero especialmente en zonas de los Andes donde, desde la llegada de los españoles el nivel de mestizaje se ha incrementado considerablemente y no se puede hablar, actualmente, de una población aclimatada a la altitud.

Capítulo 3

3. Confort

En el presente trabajo es obligatoria la referencia al confort dado que el objetivo principal del mismo está relacionado con la mejora de la calidad de vida de los habitantes de zonas de altura. De la misma manera que nos ocupamos de las características de los más diversos climas que se presentan en el mundo y de buscar las formas de contrarrestarlos con tecnologías pasivas o activas para lograr un confort mayor para los habitantes del planeta, se asume que se podría también mejorar cualitativamente la vida de los habitantes de zonas de altura.

Como se ha visto en el capítulo anterior, los problemas de confort relacionados con la altitud se definen en su mayoría por la hipoxia, es decir por la falta de oxígeno en el aire.

En el presente capítulo nos referiremos a los diferentes tipos de confort que se estudian especialmente en relación al medio artificial, es decir a las edificaciones creadas por el ser humano y en las que realiza la mayoría de sus actividades, con el objeto de analizar los diferentes rangos de confort en los que el ser humano siente mayor bienestar, dejando para el final del mismo el análisis de la calidad de aire como parte importante del confort que debe ser estudiado y tomado en cuenta a la hora de crear espacios arquitectónicos.

La palabra confort es un término que nace en Francia, que fue implementado por Luis XIV y que se refiere al refinamiento del bienestar, el cual, en ese entonces, estaba en auge. Según el diccionario de la Real Academia Española (RAE, 2011) es un galicismo que se puede definir como "aquello que produce bien estar y comodidades".

Entonces, se puede asumir que el confort está relacionado por una parte con la comodidad inmediata y por otra con la salud, es decir, con el bienestar a largo plazo. Ahora bien, la comodidad del sujeto puede ser respecto de algo externo o respecto a algo interno o intrínseco a la persona y dado que esto se puede entender desde muchos puntos de vista, el término de confort puede llegar a ser un concepto demasiado amplio y ambiguo por lo que para el presente trabajo se limitará **solo al bienestar de las personas respecto al uso de espacios arquitectónicos**, es decir respecto al medio artificial en el que viven, tomando en cuenta los dos aspectos de tiempo antes mencionados.

El primer aspecto estaría relacionado con el confort inmediato (comodidad): cuando las personas no sienten la necesidad de cambiar las condiciones que habitan porque se sienten completamente cómodas. Se refiere exclusivamente a un estado de satisfacción y comodidad inmediato y completo para el individuo, implica un momento en el cual éste es totalmente indiferente al medio puesto que al sentirse en total bienestar, no se ocupa del mismo y no siente la necesidad espontánea e inmediata de modificarlo.

El segundo y más complejo, es el bienestar a mediano y largo plazo: aquel que mantiene en equilibrio la salud de las personas y por lo tanto relaciona las condiciones de habitabilidad externas al individuo con las sensaciones internas del individuo a corto, mediano y largo plazo y de las que la persona puede o no ser consciente inmediatamente pero que tienen una influencia determinante en su salud.

En ambos casos, queda claro que el término se refiere a una sensación totalmente subjetiva que está en íntima relación con las características físicas y psicológicas individuales y con la forma que el ser humano percibe su entorno inmediato, pero en el segundo caso, además, existe relación con el tiempo que se pasa en un espacio específico y que puede afectar a la salud.

Así, al margen del tiempo en que un ser habita un espacio, está claro que los factores que influyen en el confort dependen de las condiciones intrínsecas de cada ser humano; para la mayoría de los autores especializados en confort existen los factores internos que determinan la relación con el entorno de cada individuo como ser, el estado de salud, la raza, el sexo, la edad, las características fisiológicas, el estado de ánimo, el grado de actividad metabólica, etc.

Por otra parte, los factores externos que influyen al bienestar de una persona con respecto a su entorno arquitectónico están relacionados con el grado de arropamiento, tipo y color de la vestimenta, factores ambientales tales como la temperatura del aire, la radiación, la humedad del aire, la velocidad del viento, niveles lumínicos, niveles acústicos, calidad del aire, olores, ruidos, elementos visuales, etc. (Fuentes Freixanet, 2010)

En la Ilustración 8 se han categorizado tanto los factores externos como los factores internos que influyen en el confort del ser humano, los mismos que además, se subdividen en otros 3 subsistemas y estos en variables que los integran (Mayorga, 2005)⁸.

Como se puede observar, el confort del ser humano es un tema sumamente complejo, que está determinado por una serie de factores con muchas variables y con un carácter totalmente subjetivo, lo que dificulta aún más su estudio y los límites que lo enmarcan, las variables climáticas son solo un aspecto del confort que por muy importantes que sean no deben limitar el análisis del resto de los elementos que afectan al bienestar del ser humano

Por otra parte, es importante aclarar que como en casi todos los aspectos de la vida, dentro de un grupo mayor de personas siempre habrán grupos de coincidencia y de rechazo por lo que, para lograr consenso, en lo que respecta a este tema, se considera que si el 80% de un grupo se siente en confort dentro de un espacio determinado, se puede asumir que el ambiente está dentro de un rango de confort

⁸ Si bien esta tabla ha sido tomada de un estudio específico sobre el confort térmico, se puede asumir que un análisis del confort en general tomará en cuenta por lo menos las mismas variables.

adecuado. Asimismo, se puede esperar que por razones íntimas, en un grupo heterogéneo de personas haya aproximadamente un 5% que no coincidan con el resto y, aunque no siempre sean las mismas, es probable que este porcentaje se presente en diversas circunstancias y con diferentes tipos de personas o grupos.

Categoría	Subsistema	Variables que integran los sistemas
Factores externos al ser Humano	Ambiente Natural	Temperatura del aire - Radiación Solar - Humedad del Aire Viento - Presión Atmosférica - Fenómenos Meteorológicos
	Ambiente construido	Orientación y Dimensiones del Espacio Arquitectónico Tipo de materiales de construcción - Formas interiores del espacio Aberturas: forma, ubicación, funcionamiento -El Color del espacio Diferencias de confort térmico en un mismo espacio
	Ambiente Social	Tradiciones y costumbres del sujeto - Grupo étnico del sujeto Grupo social y económico del sujeto - Participación en grupos deportivos, sociales, políticos, etc.
Factores Internos al ser Humano	Parte Social del Humano	Tipo de Vestimenta - Hábitos de Alimentación - Tipo de bebidas ingeridas - Grado de Aclimatación que incluye: ✓ Lugar de Nacimiento ✓ Características del espacio donde vive ✓ Tiempo de permanencia diaria en ese espacio ✓ Tiempo en años de esa vivencia espacial
	Parte biológica del ser humano	Color de piel del sujeto - Estado de salud - Adaptación física (Temperatura, Presión arterial, pulso) - Descompensación física (Temperatura, presión arterial, pulso) - Edad del sujeto - Tiempo previo de ingestión de alimentos Tiempo de vigilia del sujeto - Tiempo de permanencia del sujeto dentro del local - Tiempo previo de realización de alguna actividad corporal - Metabolismo basal - Metabolismo muscular - Peso del sujeto - Estatura del sujeto - Sexo (Género) Placer - Activación - Control - Psicofísica, que incluye:
	Parte Psicológica del ser humano	✓ Contacto visual con el exterior ✓ Ruidos ✓ Olores ✓ Tacto Memoria Térmica - Estado de ánimo del sujeto - Variables dependientes, medidas como opinión cognoscitiva (sensación – percepción) y opinión afectiva (preferencia)

Ilustración 8.- Modelo holístico formal representado el confort Térmico del ser humano (Mayorga, 2005)

Con relación al ambiente interior en el que el ser humano pasa más del 90% de su tiempo, al menos en los países desarrollados (Frontczak & Wargocki, 2011), varios autores han realizado estudios de los factores que influyen en el confort y bienestar humano, pero la mayoría de los mismos se limitan a solo

un aspecto del ambiente y no a todos ellos, por ejemplo se limitan a estudiar solo la calidad de la luz, o la calidad del sonido o la temperatura de un ambiente y la humedad del mismo y se han logrado rangos de confort interesantes para la mayoría de los aspectos estudiados por separado.

Dada la complejidad del tema y debido a que resulta realmente difícil abarcar todos los aspectos en un solo estudio, a la fecha no se ha elaborado un estudio que tome en cuenta todos los factores juntos que pueden influir en el confort humano, los más estudiados y donde se tienen más datos son los siguientes: (Frontczak & Wargocki, 2011)

- | | |
|--------------------|---|
| ✓ Confort Térmico | ✓ Confort Respiratorio o Calidad del Aire |
| ✓ Confort Lumínico | ✓ Confort Psicológico |
| ✓ Confort Acústico | |

Asumiendo esta categorización de los tipos de confort, a continuación pasaremos a estudiarlos por separado para lograr una comprensión más profunda de cada uno de ellos.

3.1.- Tipos de Confort

Como hemos visto, el término confort puede abarcar muchos aspectos y no todos ellos son fáciles de medir e incluso en aquellos que lo son, solo se pueden establecer rangos entre los cuales la mayoría de personas podrían sentirse cómodas pero algunas seguirían sintiéndose incómodas.

Dado que no se han encontrado estudios de confort completos, que abarquen todos los aspectos que influyen en el mismo, se han tomado en cuenta solo aquéllos que han sido estudiados y en los que se han logrado determinar rangos de confort bastante acertados para la mayoría de individuos. Según el estudio realizado por, (Frontczak & Wargocki, 2011), los más relevantes son: el confort térmico, el más importante para la mayoría de los usuarios, el confort acústico que tiene una importancia similar al relacionado con la calidad de aire y el confort visual, que vendría a ser el mismo que el lumínico. (Ver Ilustración 9).

Es importante aclarar que existen varias situaciones en el tipo de vida que se da a nivel urbano que afectan a la salud y la comodidad del ser humano y que no se han tomado en cuenta en este capítulo por no existir rangos objetivos de medición. A continuación, se detallan los diferentes tipos de confort, para lo cual se utilizará la clasificación explicada anteriormente y que queda detallada en la siguiente ilustración:

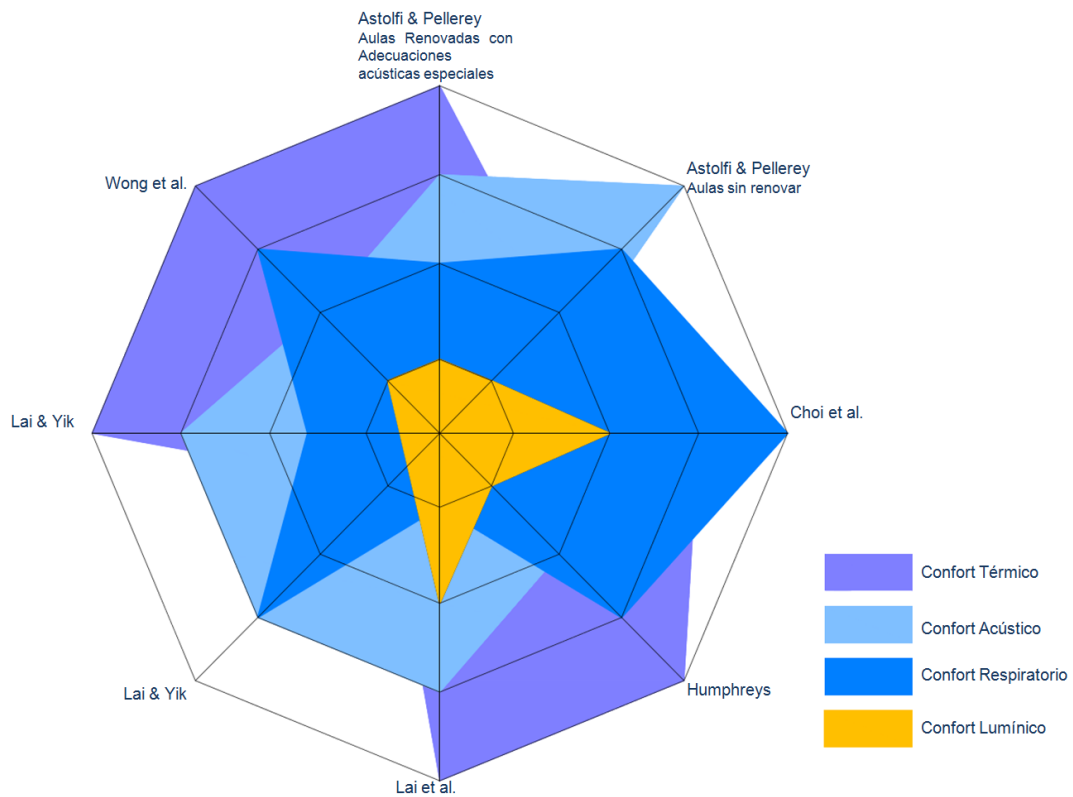


Ilustración 9.- Importancia de las diferentes condiciones para la satisfacción total respecto a la Calidad del Ambiente Interior (IEQ), el número más alto indica mayor importancia (Frontczak & Wargocki, 2011)

3.2.- Confort Térmico

El confort térmico es aquel que se percibe por el sentido del tacto, por lo que el órgano relacionado más directamente con este aspecto es la piel, sin embargo también se ven afectados los pulmones ya que está determinado por el intercambio térmico entre el ambiente y el cuerpo (Szocolay, 1980) .

Según la Organización Internacional para la Estandarización (ISO por sus siglas en inglés), la sensación térmica de un individuo está determinada especialmente por el equilibrio térmico de su cuerpo como un todo. (ISO7730, 2005). Este equilibrio o desequilibrio determinará si un sujeto está o no en confort en ciertas circunstancias por lo que la valoración del mismo es totalmente subjetiva.

El confort térmico, se puede definir como aquel en el que una persona se siente completamente satisfecha con la temperatura del ambiente que lo rodea y no necesita cambiar nada relacionado con esto. Se ve influido por una parte por las características ambientales tales como la temperatura del aire, la temperatura media radiante, la velocidad relativa del aire y la humedad, por otra parte, por las variables relacionadas con las personas como son el grado de actividad de las mismas y la vestimenta. Además, para que un espacio sea considerado confortable son necesarias otras variantes como por ejemplo que no haya radiación directa asimétrica⁹, que no hayan superficies interiores con temperaturas muy altas o muy bajas, o que no hayan diferencias muy altas en la temperatura vertical del aire. (Frontczak & Wargocki, 2011).

Aunque generalmente el confort térmico se toma como algo que afecta a todo el cuerpo, la norma Internacional (ISO7730, 2005), reconoce que el disconfort térmico también puede producirse por diferencias de temperaturas en una parte particular del cuerpo, al que llama disconfort térmico local (PD)¹⁰ y que está determinado por : corrientes de viento, (DR%, por sus siglas en inglés Draught Rate); diferencias en la temperatura vertical del cuerpo, por ejemplo pies y cabeza, pisos muy calientes o muy fríos, asimetría radiante, cubiertas muy calientes y paredes frías o al contrario.

Dado que en definitiva el confort térmico depende de todos los factores mencionados anteriormente, se han elaborado diferentes instrumentos para acercarse a un rango en el cual la mayoría de las personas se sientan confortables, así, muchos autores han contribuido al cálculo del confort térmico y por lo tanto a la posibilidad de diseñar en los diferentes entornos, edificios cada vez más adecuados a las necesidades del ser humano y a las características específicas de cada lugar.

En la Ilustración 10 se detallan las contribuciones más relevantes con relación a los límites de confort térmico para diferentes entornos y según diferentes autores. Estos estudios utilizan la capacidad innata de adaptación del ser humano a las diferentes condiciones climatológicas y además la capacidad de adaptar su comportamiento y/o sus costumbres a la nueva situación, por ejemplo cambios de indumentaria entre el invierno y el verano, de colores y/o de alimentos, etc.

⁹ Aunque los autores no lo explican, se asume que la "radiación asimétrica directa" se da cuando hay mucha radiación por solo uno de los extremos de un ambiente, es decir, superficies muy cálidas o muy frías con respecto al resto de los elementos en la misma habitación.

¹⁰ PD por sus siglas en ingles: Percentage Dissatisfied % Porcentaje de insatisfacción

Principales Autores	Límites de la temperatura del aire de la zona de confort térmico	Observaciones
Víctor Olgyay	23,9°C a 29,5°C	Trópicos
ASHRAE	20,55°C a 24,44°C (Invierno) 23,33°C a 27,22°C (Verano)	Bienestar óptimo
Yaglou-Drinker	18,8°C a 23, 8°C	EEUU Verano (T.E)
Masterton J.M y Richardson F.A.	20°C a 29°C	Canadá para la época calurosa de Verano
Koengsberger y Otros	22°C a 27°C	(Trópicos)
C.E. Brooks	23,3°C a 29, 4°C	Trópicos
Auliciems A. (Trabajos de 1981 a 1993)	Establece la siguiente expresión:	Trópicos
Auliciems A. y S. Szokolay (1997)	$T_n: 17,6 + 0.31 T_m$ <p>Ejemplo: Ciudad de México</p> <p>Mes más frío: Diciembre, T_n 21,8° C</p> <p>Mes más cálido (Abril) T_n 27, 3°C</p> <p>Intervalo para el mes más frío: de 18,3°C a 25,3°C</p> <p>Intervalo para el mes más cálido: De 20,3°C a 27,3°C</p>	<p>Donde el intervalo de la zona de confort térmico se encuentra a +/- 3,5°C de T_n, para un 80% de aceptación de los usuarios de un espacio arquitectónico.</p> <p>Para un 90% de aceptación el intervalo o rango de confort es de +/- 2,5°C</p>

Ilustración 10.- Límites de la temperatura del aire de la zona de confort térmico (Mayorga, 2005)

Sin embargo debido a las características individuales del ser humano es imposible estandarizar los rangos de confort o desconfort térmico en un ambiente dado y, como se ha dicho antes, se espera que siempre haya unas cuantas personas disconformes, para disminuir el número de éstas. Existen tablas que ayudan a lograr ambientes donde una gran mayoría de las personas pueden sentirse a gusto, estas tablas están basadas principalmente en dos aspectos: el PPD¹¹ o PIE (Porcentaje de Insatisfacción Estimada) en castellano, que establece el número de personas que se verán en confort en un ambiente con ciertas características, y el PMV¹² o Voto Promedio

¹¹ Por sus siglas en inglés PPD Predicted Percentage Dissatisfied: Porcentaje de Insatisfacción Estimada

¹² Por sus siglas en inglés PMV Predicted Mean Vote: Voto Promedio Previsto

Previsto, que es un índice establecido por el voto de un grupo de varias personas basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano utilizando la siguiente escala:

Muy caliente	Caliente	Un poco caliente	Neutro	Un poco frío	Frío	Muy Frío
3	2	1	0	-1	-2	-3

Ilustración 11.- Escala Térmica de 7 puntos (ISO7730, 2005)

En relación a todos estos aspectos, esta norma establece la siguiente tabla con las categorías térmicas del medio ambiente que están referidas tanto al cuerpo humano en su conjunto como al discomfort local, es decir a una sola parte del cuerpo.

Categoría	Sensación térmica global			Discomfort Local		
	PPD%	PMV	DR%	PD %		
				Temperatura Vertical del Aire	Piso caliente o frío	Radiación asimétrica
A	<6	-0.2<PMV<+0.2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0.5<PMV<+0.5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7	<30	<10	<15	<10

Ilustración 12.- Confort térmico para diferentes categorías de ambiente y tipos de espacios, Donde PPD se refiere al Porcentaje porcentual de insatisfacción, PMV, Voto Previsto Promedio, DR% Porcentaje de insatisfacción por la corriente de aire, PD%¹³ Porcentaje de insatisfacción debido a los tres parámetros indicados. (ISO7730, 2005)

Cada una de estas categorías describe un máximo porcentaje de discomfort para la totalidad del cuerpo (PPD) y para solo una parte del mismo (PD) según los elementos que lo provocan. (ISO7730, 2005)

¹³ El porcentaje de Insatisfacción se determina tomando en cuenta la Temperatura Vertical del aire, el Piso Caliente o frío y la Radiación asimétrica.

Desde el punto de vista de la salud, los órganos que se ven más afectados por un discomfort constante desde el punto de vista térmico, puede estar relacionado con el sistema respiratorio y con el sistema circulatorio, aunque exposiciones prolongadas a temperaturas muy frías pueden provocar desequilibrios en todo el cuerpo, especialmente en los riñones y las temperaturas muy altas pueden provocar deshidratación importante. Ambos extremos pueden ser fatales para el ser humano.

3.3 Confort Acústico

El confort acústico está directamente relacionado con el sentido del oído, que percibe el sonido, lo transmite al cerebro y éste lo interpreta, el factor determinante del confort acústico es el sonido, y éste se produce por la vibración de algún cuerpo y se propaga por el aire.

En términos generales, es muy difícil encontrar un ambiente sin ruido, incluso en el campo, la naturaleza tiene sus propios sonidos que el ser humano utiliza como forma de percibirla, por ejemplo hay ciertos sonidos que el ser humano identifica de inmediato sin necesidad de ver las fuentes, así mismo, es capaz de determinar la cercanía o lejanía de la fuente de ruido con solo escucharlo, así pues se puede decir que el ser humano utiliza el sonido como una forma de percepción del espacio y de sus dimensiones, aunque muchas veces no ponga una atención consciente a ésta.

El confort acústico está relacionado no sólo con una calidad del sonido, al contrario, el término generalmente se asocia con la carencia de una molestia provocada por el ruido, esto está íntimamente relacionado con la propagación del sonido, que, como se ha dicho, se hace a través del aire y que tiene características propias como son el nivel del sonido (presión), la frecuencia y el tiempo de reverberación por una parte, y las características del ambiente que están relacionadas con la calidad de los materiales y el grado de absorción o aislamiento que los mismos puedan tener por otra.

Dado que el confort acústico está relacionado con la intensidad del mismo, para poder comprenderlo es necesario medirlo y para hacerlo se utiliza el decibelio que es una unidad de medida logarítmica, debido a que la sensibilidad del oído humano se asemeja más a este tipo de escala que a una lineal.

Dado que es una medida escalar y no matemática, se aplica a una escala a la que se le asigna el valor de 0 en el “Umbral de audición”, es decir de la presión a partir de la cual un ser humano es capaz de escuchar el sonido, ésta es equivalente a 20 micropascales. Dicha escala se prolonga hasta una presión máxima correspondiente a 120dB, lo que es considerado el “Umbral del dolor”, es decir la intensidad máxima que un ser humano puede escuchar sin sentir dolor.

FUENTES DE SONIDO	DECIBELES
Umbral de audición	0
Susurro, respiración normal, pisadas suaves	10
Rumor de las hojas del campo al aire libre	20
Murullo, Oleaje suave de la costa	30
Biblioteca, habitación en Silencio	40
Tráfico Ligero, Conversación normal	50
Oficina Grande en horario de trabajo	60
Conversación en voz muy alta, gritería tráfico intenso de la ciudad	70
Timbre, Camión pesado moviéndose	80
Aspiradora funcionando, Máquinaria de una fábrica trabajando	90
Banda de Música rock	100
Claxon de un coche, explosión de petardos o cohetes de pirotecnia	110
UMBRAL DEL DOLOR	120
Martillo neumático de aire	130
Avión de Reacción durante el despegue	150
Motor de un cohete espacial durante el despegue	180

Ilustración 13.- Niveles de Ruido desde el nivel de audición hasta límites extremos de dolor. (Álvarez, 2004)

Es importante indicar que la sensibilidad del ser humano al sonido es subjetiva. Cada persona tolera el sonido de manera particular, esto puede estar determinado por la salud de la persona, la edad e incluso la costumbre a un sonido específico o el grado de atención que el oyente está poniendo, otro de los factores que influye son las circunstancias que rodean al oyente. Por

ejemplo éste no percibe de la misma forma el ruido del patio de una escuela cuando está paseando por la calle que cuando está trabajando en una oficina aledaña a la escuela. El ruido es simplemente el sonido que, por sus características, incomoda a una o más personas, esto se puede producir cuando el sonido es muy alto, muy agudo, repetitivo, etc.

Desde el punto de vista de la salud el estar constantemente en espacios con niveles muy altos de ruido puede provocar altos grados de estrés, trastornos del sueño, pérdida de atención, distorsiones en la capacidad auditiva y hasta problemas de desequilibrio mental.

Al igual que la luz, el sonido puede tener características curativas para la salud del ser humano y se conocen terapias específicas basadas exclusivamente en el sonido y algunas específicamente en la música, como la musicoterapia o que está basada en la empatía de las emociones del ser humano con ciertas notas musicales, de tal manera que cierta música estimulará la expresión de algunos sentimientos y otra música la de otros.

3.4 Confort Lumínico

El confort visual se define como la condición subjetiva de bienestar inducida por el ambiente visual (Frontczak & Wargocki, 2011), aunque esta definición implica una sensación psicológica, el confort lumínico es susceptible a mediciones y estandarizaciones objetivas gracias a las características físicas de la luz y su relación con el medio. Así, las condiciones visuales están caracterizadas por la iluminancia¹⁴, la luminancia¹⁵, la temperatura de color¹⁶, la reproducción del color¹⁷, además del deslumbramiento, las oscilaciones y la cantidad de luz natural. (Frontczak & Wargocki, 2011)

El confort visual es aquél que se percibe a través de la vista, por lo que los órganos principales son los ojos, que reciben la luz y la transmiten al cerebro que forma las imágenes. El ojo humano está diseñado para percibir la luz solar y para adaptarse a los cambios de intensidad que hay naturalmente en condiciones normales externas o internas. El ojo humano solo puede percibir las longitudes de onda comprendidas entre 380 y 720 nm, por lo que la luz visible se limita a

¹⁴ Iluminancia: Cantidad de flujo luminoso que incide en una superficie, se mide en lux (lux= lúmenes/m²)

¹⁵ Luminancia: Cantidad de luz reflejada desde una superficie en una dirección específica, se expresa en Candelas/m²

¹⁶ Temperatura de color: Tonalidad aparente de una fuente luminosa Fría de 4100 K adelante; neutra de 3100 a 4000 K y Cálida de 3000 a 1500 K

¹⁷ Reproducción de color, CRI: Capacidad de la luz de reproducir el color, se mide en porcentaje. Las lámparas incandescentes tienen un CRI del 100%, mientras que las más eficientes de descarga solo alcanzan al 85%.

estos rangos, las longitudes mayores corresponden a las ondas ultravioletas y las menores a las infrarrojas.

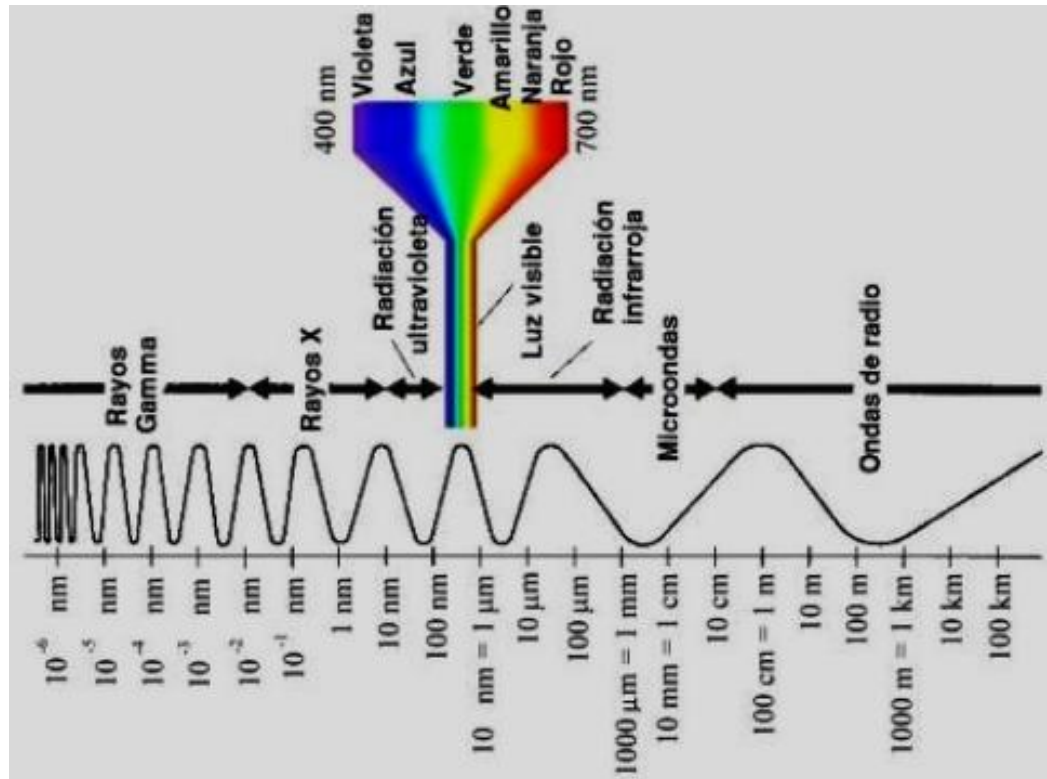


Ilustración 14.- Espectro de luz visible y radiación ultravioleta e infrarroja (Palmer N., 2011)

La luz solar, además de proveer un ambiente perfecto para el ojo humano, también influye en el ser humano de varias maneras muchas de las cuales no están relacionadas con el campo visual propiamente dicho, se sabe por ejemplo que la luz natural tiene ciertas propiedades que estimulan funciones fisiológicas en el cuerpo humano que la luz artificial no logra hacerlo.

Sin embargo dado la imposibilidad de tener acceso constante a la luz solar en el interior de los edificios, se han hecho grandes avances en lo que se refiere a la calidad de la luz artificial, logrando rangos interesantes de confort según el tipo de ambiente, la función de los espacios arquitectónicos y la actividad que se realiza en ellos.

Sin embargo, es importante tomar en cuenta que en algunos casos las exposiciones prolongadas a luces artificiales como son las lámparas fluorescentes pueden ser dañinas, ya que

pueden afectar a la salud especialmente de la piel y los ojos, por la radiación ultravioleta y la luz azul que emiten. (GreenFacts, 2001 -2011).

Desde el punto de vista de la salud, se puede decir, además, que la luz influye en la parte psicológica de las personas de una manera determinante. Períodos prolongados sin ver la luz solar pueden generar altos grados de depresión y pueden provocar desequilibrios de diferente índole.

Como actualmente se conoce que el cuerpo humano es sensible a la luz, esta se utiliza para lograr equilibrio emocional en las personas con depresiones, asimismo para el tratamiento de ciertas afecciones de la piel e incluso para tratamientos relacionados con la producción de hormonas y varios tipos de trastornos relacionados con estas. Esta especialización, llamada luminoterapia, es actualmente una de las ramas donde más se está investigando tanto desde la visión alternativa como desde la medicina alopática, especialmente en lugares donde las horas de luz solar son limitadas.

3.5 Confort Psicológico

El confort psicológico está íntimamente relacionado con todos los demás. Todos y cada uno de ellos influyen en el aspecto psicológico de la persona ya sea de manera global o particular. No hay un órgano específico relacionado con el confort psicológico ya que todos lo están de una u otra manera pero el cerebro es el que procesa toda la información por lo que cabría decir que es el órgano directamente responsable de este confort, aunque realmente éste se ve estimulado por muchas características innatas de la persona que pueden estar relacionadas con su carácter, su educación, el momento que está viviendo y un sin fin de otros elementos que no pueden ser tomados en cuenta objetivamente.

Lo más importante para sentirse cómodo es estar saludable tanto física como mentalmente y ésta es una de las razones que impulsa a unir el concepto de confort con el de salud, porque realmente son inseparables.

El confort psicológico es además altamente influenciado tanto de forma negativa como positivamente, por ejemplo cuando equilibra sensaciones térmicas negativas a través de otros estímulos como ser el color, o una música agradable, o como ejemplo negativo, si el contacto con la fuente de contaminación es directo, es decir se percibe con los ojos, o un olor es

demasiado fuerte, la contaminación se siente más intensamente que si no se hubiera tenido contacto aunque los niveles objetivamente sean los mismos.

De igual manera, el conocimiento previo de una situación menos adecuada puede influir negativamente a la persona, por poner un ejemplo relacionado con el tema del presente trabajo, es muy común que personas perfectamente sanas se vean más afectadas por la llegada a la altura cuando conocen el fenómeno que cuando no lo hacen.

3.6 Confort Respiratorio

Lo que aquí se ha elegido llamar confort respiratorio, en otros documentos aparece como confort olfativo (Fuentes Freixanet, 2010) o calidad del aire (Frontczak & Wargocki, 2011). Aunque muchos otros autores no lo toman en cuenta, está relacionado directamente con el sentido del olfato pero además está especialmente relacionado con la respiración y con el intercambio de aire entre el cuerpo y el ambiente, por lo tanto con todo el sistema respiratorio, por lo que puede tener efectos muy importantes en la salud del ser humano.

Con el objeto de abarcar todo lo referente al confort respiratorio se ha separado el mismo en dos grandes apartados: el olfativo, que está ligado a las sensaciones inmediatas del ser humano y que pueden ser agradables o desagradables y la segunda que está relacionada con la calidad del aire en relación a los componentes del mismo y que puede o no ser notada por la persona pero que afecta al bienestar del ser humano a inmediato, mediano y largo plazo.

3.6.1 Confort olfativo: es aquél que está directamente relacionado con la percepción de olores agradables o desagradables que pueden estar asociados incluso a irritaciones de la mucosa nasal; es una respuesta psicofisiológica del ser humano que puede provocar un alto grado de confort o discomfort entre las personas de un determinado ambiente.

En general se refiere al aire interior de un ambiente y está asociado con olores provocados por el mismo ser humano como son los efluentes biológicos, el humo del tabaco, materiales de oficina y de limpieza u otras actividades. No se catalogan como contaminantes ya que en general son inocuos aunque incómodos. Dependen de muchos factores como ser la raza de las personas, el tipo de alimentación y las costumbres higiénicas y en general se pueden evitar con una buena ventilación.

A continuación se detallan las diferentes vías de acceso o de producción de malos olores ya sean estas exteriores al ambiente o interiores.

Origen	Entrada o generación	Ejemplos
Exterior	Ventilación	Humos de automóviles, asfalto, construcciones, industria
	Subsuelo	Derrames y fugas de productos químicos al subsuelo
	Desagües	Alcantarillado
Interior	Ocupantes	Biofluentes, humo de tabaco
	Actividades	Material de oficina, fotocopiadoras, impresoras laser, cocinas, estufas, materiales para el mantenimiento y limpieza.
	Estado del edificio	Humedades, Aire acondicionado
	Obras	Disolventes, adhesivos, pinturas, barnices
	Materiales de construcción	Paneles, moquetas, tapicerías, mobiliarios

Ilustración 15.- Principales fuentes productoras de olores (Subils, 2002)

Aunque los malos o buenos olores no suelen afectar directamente la salud del ser humano si son un factor determinante en el confort de un espacio y pueden llegar a ser el motivo principal para que las personas eviten estar dentro del mismo, los olores sumamente irritantes o tóxicos relacionados con pinturas o químicos utilizados en construcción, carpintería u otros pueden afectar al bienestar inmediato de la persona y pueden provocar molestias de salud como ser cefaleas o irritaciones nasales por lo que es importante evitar el uso de los mismo en ambientes habitados.

3.6.2 Calidad del aire: generalmente este concepto está asociado con el aire exterior, es decir con la contaminación ambiental, sin embargo el presente trabajo está relacionado con la calidad de aire en zonas en las que el aire puede ser muy puro pero no es suficiente para la fisiología humana, es por esta razón que la calidad de aire se analizará desde dos puntos de vista: el que se refiere a la pureza de aire y aquel que se refiere al contenido de oxígeno en el mismo.

Según (Frontczak & Wargocki, 2011) la calidad de aire se define como aquella que no contiene contaminantes en concentraciones dañinas y en el que un 80% o más de las personas que lo respiran no expresan insatisfacción.

- **3.6.2.1 Contaminación ambiental:** se refiere sobre todo a la contaminación producida por diversos carburantes, o por la contaminación producida por la industria y también por los desagües o las alcantarillas. Está relacionada con la carga exagerada de gases indeseados en la atmósfera que pueden afectar a la salud del ser humano y de todos los seres vivos.

Compuesto	Donde se encuentran	Valor de referencia basado en efectos sensoriales o molestias por olor (30 minutos)	Valor de referencia basado en efectos para la salud no cancerígenos (24 horas)
Estireno	Se usan en la fabricación de caucho, plásticos, material aislante, cañerías, partes de automóviles, envases de alimentos y revestimiento de alfombras.	70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tracto respiratorio y sistema nervioso central)
Formaldehído	Utilizado en láminas de aglomerado de madera utilizadas para la fabricación de muebles, algunos aislantes, pinturas, barnices, incluso textile como cortinas, alfombras o ropa y el humo del tabaco. Está clasificado como cancerígeno por la IARC. (International Agency for Research on Cancer) (IARC, 2012)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (irritación ocular)
Tetracloroetileno	Disolvente de limpieza de textiles y metales	8 mg/m^3	5 mg/m^3 (Sistema nervioso central, piel)
Tolueno	Materia prima para la obtención de poliuretano, medicamentos, colorantes, perfumes, TN, y detergentes. También lo contiene el humo del tabaco.	1 mg/m^3	8 mg/m^3 (Piel, Irritación mucosas, Sistema Nervioso)
Disulfuro de Carbono	Procesos de Manufactura, fabricación de fibras de celulosa, plaguicidas.	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Cambios neurológicos)
Sulfuro de Hidrógeno	Desinfectante agrícola, elaboración de cerveza, encurtidos, fabricación de pegamentos, de rayón o seda artificial, tintes, litografía, fotograbado, etc.	7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Irritación ocular)

Ilustración 16.- Valores de referencia para algunas sustancias en el aire, según la OMS, basados en molestias sensoriales por olor y en efectos para la salud, no cancerígenos. (Subils, 2002)

La ilustración anterior muestra algunos elementos que pueden provocar molestias por olor o irritaciones y los valores límites aceptables. Además es importante tener en cuenta que para el ciudadano común estos son muy difíciles de medir por lo que es necesario evitarlos en los ambientes en los que se encuentren seres vivos.

- **3.6.2.2 Cantidad de oxígeno:** Este concepto generalmente no se toma en cuenta puesto que se asume que en todos los espacios construidos, donde se realizan actividades de cualquier tipo existe aire y por lo tanto oxígeno, pero no siempre es así, al menos no en las proporciones suficientes en las que el ser humano se encuentra totalmente confortable.

Como veremos en el capítulo dedicado a la altura, en todo el planeta hay 140 millones de personas que viven sobre los 2500 msnm, altura a partir de la cual se considera que la salud del ser humano puede ser afectada por la falta de oxígeno en la atmósfera y un alto porcentaje de la población sufrirá lo que se ha venido a llamar el mal de altura o el mal de montaña (sorocho o soroche en quechua y aimara en la zona andina).

La mayoría de estas poblaciones pertenecen a ciudades ubicadas en países con un alto grado de crecimiento por lo que es factible asumir que pronto esa población se incrementará considerablemente, (Cabrera, 2005), (ver ilustración 17)

País	Población Total	Crecimiento anual (%)	% estimado sobre los 2500 msnm	Total población estimada sobre los 2500 msnm (por continente)
Africa	156,464,000	2.60	15	24,301,950
Asia	499,099,288	2.80	15	78,678,935
América	520,603,000	1.80	7	36,589,550
Total				139,570,435

**Ilustración 17.- Estimación del número de personas que viven sobre los 2500 msnm (hasta 1995).
Elaboración propia basada en la tabla del Cap. 2 de Hight Altitude (Hornbein & Schoene, 2001)**

Por otra parte, tomando en cuenta lo que establece la Organización Mundial de la Salud en el Acta de su constitución: "La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no solamente la ausencia de afecciones o enfermedades. El goce del grado máximo de salud que se pueda lograr es uno de los derechos fundamentales de todo ser humano sin distinción de raza, religión, ideología política o condición económica o social." (OMS, 1946), en este trabajo se asume que es importante empezar a buscar soluciones a un problema que afectará la salud de cada vez más personas.

En este sentido y partiendo de la base de que todos los ambientes tienen aire, es importante añadir que, en lo que se refiere a zonas de altura, el concepto de calidad de aire se define especialmente por la cantidad de oxígeno en el mismo y, aunque en algunos casos se pueden dar la circunstancia adicional de la contaminación, el dar una solución a la carencia de oxígeno debe ser tan importante como dar una solución a la contaminación.

Si bien es muy cierto que las personas que viven en altura terminan aclimatándose a las condiciones atmosféricas en las que viven, no es menos cierto que lo hacen poniendo al cuerpo en estados de estrés constante y que sufren tanto de forma inmediata como a largo plazo de una serie de afecciones de mayor o menor importancia para la salud que se van agudizando con la edad y la estadía en la altitud.

Desde el punto de vista de la salud, la hipoxia, o la falta de oxígeno en la sangre, es una de las razones más importantes por las cuales el ser humano presenta una serie de sintomatología al llegar a las zonas altas que pueden ser desde incómodas hasta muy peligrosas y, como se ha visto en el capítulo dedicado a la Vida en Altura, un incremento de la presión de oxígeno en el aire puede mejorar notablemente la calidad de vida en las zonas de altura, significando una salud mejorada a largo plazo para mayor cantidad de habitantes.

Si bien no es posible definir un rango de confort exacto relacionado con la altitud en la que se vive, en el capítulo correspondiente a la propuesta se plantea un incremento de oxígeno que simule una altitud más benévola para el ser humano ya que esto puede representar un cambio importante tanto en el confort como en la salud del habitante de altura.

Como se ha visto el confort respiratorio abarca una serie de condiciones que deben ser tomadas en cuenta necesariamente por separado, es un campo en el cual hay aún mucho por descubrir y mejorar, es importante entender que a través del aire recibimos el elemento sin el cual la vida no sería posible, además de otros elementos que pudieran hacernos mucho daño por lo que la búsqueda de mejorar de una u otra forma el aire que respiramos hacia el interior de los edificios es esencial para lograr un bien estar, una mayor calidad de vida y alto grado de salud, por lo que se considera importante ampliar la investigación relacionada con la calidad de aire en los diferentes ambientes del planeta.

Todos los factores detallados anteriormente están claramente relacionados con el confort y la comodidad inmediata del individuo con su entorno, sin embargo, más allá de lo cómodos que podamos estar en un ambiente, es importante tomar en cuenta que las condiciones que tenemos hacia el interior de las edificaciones afectan a nuestra salud, a nuestro ánimo y por lo tanto también a nuestra economía (Frontczak & Wargocki, 2011).

Existen otros tipos de condiciones que igualmente afectan la salud que no se han tomado en cuenta en este documento dado que se han abarcado solamente aquellas que se conocen mejor y son comunes a la gran mayoría de los autores, como se ha explicado al inicio del capítulo, pero aspectos relacionados con la proliferación de antenas y los cables de alta tensión, que rodean nuestra vida diaria y que desde luego la benefician en muchos aspectos, son también elementos que afectan nuestra salud negativamente y que deben ser normados y tomados en cuenta en la arquitectura bioclimática y el eco urbanismo.

Capítulo 4

4.- Altitud

Como hemos visto en los capítulos anteriores, lo que afecta negativamente al confort de los seres humanos y en general a los seres vivos en las zonas de altura es la carencia de oxígeno por lo que, en el presente capítulo se pretende conocer todos los aspectos que están relacionados con la atmósfera y sus características, la composición del aire que respiramos, la relación de este con la altitud y las presiones atmosféricas que afectan directamente a la calidad del aire que respiramos en los diferentes lugares del planeta.

4.1.-La Atmósfera

Aunque se sabe que la atmósfera empezó a formarse hace más de 4500 millones de años, no es mucho lo que se conocía de ella hasta hace relativamente muy poco tiempo, todas las civilizaciones antiguas desde la egipcia, la griega o las mesoamericanas como la maya, han tenido conocimientos bastante profundos del universo pero ninguna de ellas se ha involucrado en el análisis de la atmósfera terrestre.

La atmósfera es la capa de gases que se mantiene alrededor de un planeta por la fuerza gravitacional de mismo; aunque todas las esferas del sistema solar tienen cierta gravedad, no todas tienen la capacidad para atraer y mantener los gases que conforman una atmósfera ya que estos se ven atraídos por las fuerzas gravitacionales del sol o de otros planetas mayores; de hecho, en el sistema solar, tan solo Titán, uno de los satélites de Saturno, tiene una atmósfera significativa y parecida a la de atmósfera primitiva de la tierra, mientras los demás planetas o satélites carecen de esta capa de gases o la capa que los rodea no es lo suficientemente significativa.

4.2.- Historia

Se sabe que la primera atmosfera que tuvo la tierra, misma que estaba compuesta básicamente por elementos cedidos por el sol, helio e hidrógeno, se perdió por la debilidad de su campo gravitacional (West, 2001).

Posteriormente, la atmósfera se vuelve a formar con los gases producidos por diferentes fenómenos químicos en el seno de la misma tierra como ser el incremento de la temperatura debido a la gran energía cinética provocada por el choque de los sólidos, la desintegración radioactiva y las erupciones volcánicas. Todo esto contribuyó a la densificación de gases formados principalmente por dióxido de azufre, dióxido de carbono, nitrógeno, nada o muy poco de oxígeno y a la evaporación de los cristales de agua que en el nacimiento de la tierra, se encontraban atrapados dentro de los sólidos.

Esta primera atmósfera de la tierra era muy densa y no permitía el paso de la luz; por otra parte, era anaeróbica, es decir que no contenía oxígeno o que lo contenía en muy poca cantidad y por lo tanto no

era un medio apto para la vida, es por eso que se asume que los primeros organismos vivos, las protocélulas, no necesitaban de oxígeno y obtenían su energía en químicos como el azufre, el metano o el hierro y, al no sintetizar el agua, el producto final de desecho no era el oxígeno, sino otros elementos como el azufre, siendo en ese entonces, el oxígeno un elemento tóxico para la poca vida que existía en el planeta.

Posteriormente, hace unos 3500 millones de años, la atmósfera se hace menos densa, la superficie terrestre empieza a recibir el calor y la luz de los rayos solares lo que provoca el aumento de la temperatura terrestre, el deshielo y el crecimiento de los mares.

Estas nuevas condiciones planetarias permiten el desarrollo paulatino de las cianobacterias, organismos capaces de utilizar el agua y el bióxido de carbono con la ayuda de la luz solar para producir su propio alimento, síntesis que tiene, como material de desecho, el oxígeno, dando inicio a lo que se conoce como fotosíntesis oxigénica y marcando la ruta evolutiva de los seres vivos en el planeta.

La fotosíntesis oxigénica se debe a un tipo de evolución celular que ocurrió solo una vez en la historia de la vida en el planeta, consecuentemente, toda la fotosíntesis oxigénica actual es producida por las cianobacterias o sus descendientes, los cloroplastos contenidos por las células eucariotas. (Payne et al., 2011)

La fotosíntesis logra crear tejidos orgánicos a partir de elementos inorgánicos y cede, como elemento de desecho, el oxígeno. A partir de la proliferación de mismo, el impulso de vida cobra una nueva fuerza en el planeta y se inicia el desarrollo de millones de especies de seres vivos.

Realmente no se conoce con exactitud cuán rápido se formó el oxígeno en la atmósfera, está claro que es un proceso que se da en un período muy largo de tiempo, pero al parecer duró unos 1500 millones de años ya que aproximadamente hace 2000 millones de años, al final del Eón precámbrico, el oxígeno se incrementa en proporciones logarítmicas y, para ese entonces, la gran mayoría de las especies vivas ya tenían capacidad fotosintética.

Así pues, la luz, el agua y el oxígeno son los promotores de la vida en el planeta tal cual la conocemos hoy en día y es gracias al proceso de fotosíntesis que nuestro planeta es un lugar apto para la vida, tanto por su capacidad de renovar el oxígeno como por su capacidad de crear materia orgánica.

El oxígeno se requiere para las reacciones biosintéticas de todos los organismos eucariotas por lo que es imposible imaginar la vida compleja sobre la tierra sin él, (Payne et al., 2011). Por otra parte se piensa que la evolución del O_2 está relacionada con el tamaño y el desarrollo de los organismos que han poblado el planeta a lo largo de la historia. Aunque se sabe que algunos organismos cuentan con medios fisiológicos para adaptarse a las fluctuaciones de este gas en la atmósfera, hay varios indicios que

apuntan al O₂ como el elemento que influye de manera determinante en el tamaño de las especies. (Payne et al., 2011).

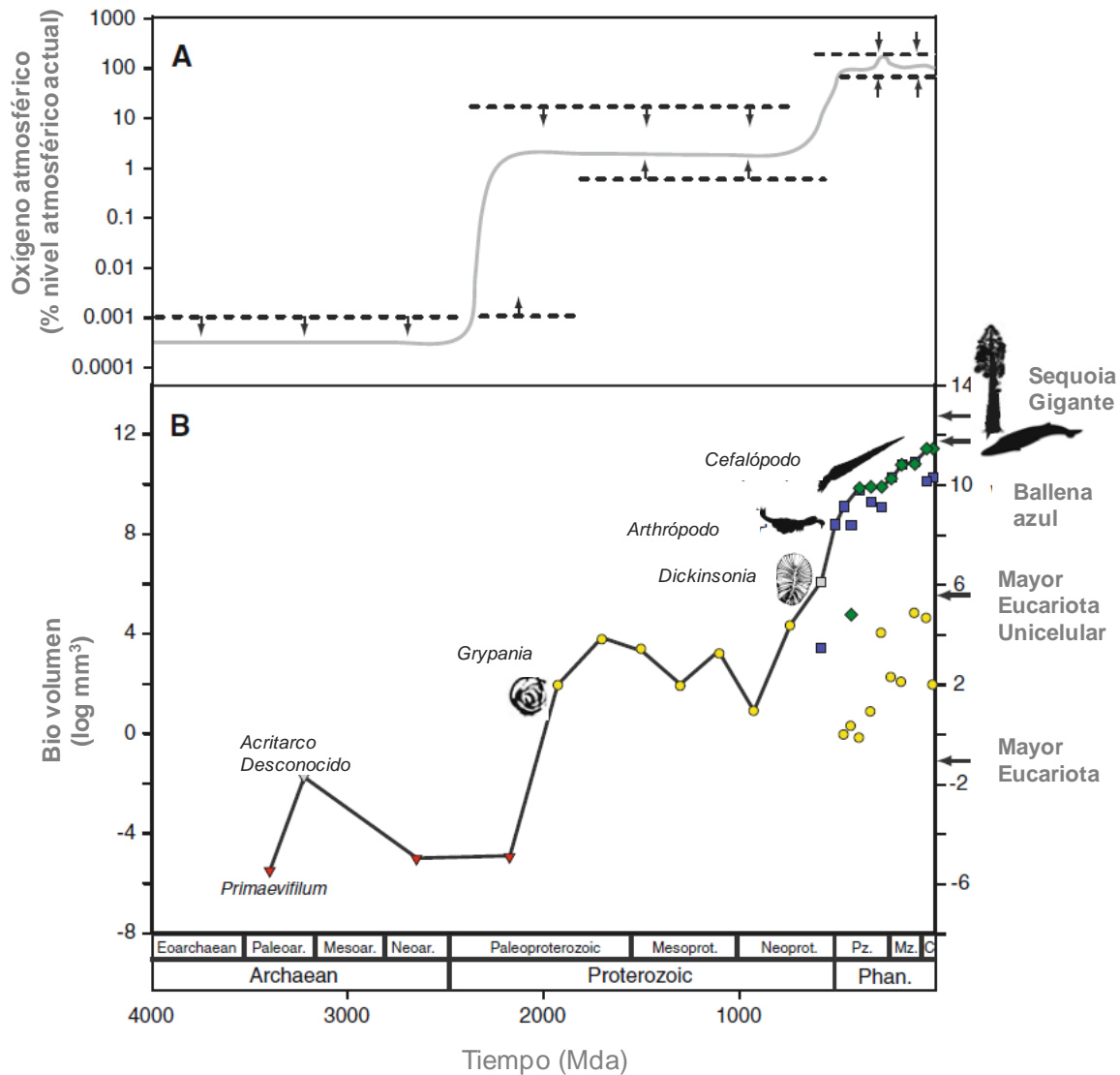


Ilustración 18.- A.- Evolución el Oxígeno atmosférico y el tamaño máximo de los organismos vivos a lo largo del tiempo geológico. Las líneas punteadas y flechas indican los límites inferior y superior de los niveles de oxígeno, la línea gris suave, indica la mejor estimación de la evolución de la PO₂. B.- Tamaños de los fósiles conocidos más grandes a lo largo de la historia, los triángulos rojos representan procariotas, los círculos amarillos representan los protistas, los cuadrados azules representan los animales y los diamantes verdes representan las plantas vasculares. (Payne et al., 2011)

La ilustración anterior nos muestra cómo a lo largo de la historia de nuestro planeta, las especies han ido evolucionando y ganando en tamaño de manera directamente relacionada con la evolución del oxígeno, pero lo que parece aún más importante es que la cantidad de oxígeno en la atmósfera no solo está relacionado con el tamaño de las especies sino también con su complejidad biológica, en cualquier caso,

en la imagen queda muy claro que a medida que el oxígeno se estabiliza en la atmósfera la vida evoluciona de forma casi paralela.

Como se observa, en el Proterozoico, antes del período Cámbrico¹⁸ ya había una cantidad más o menos considerable de oxígeno, de este periodo, a través de la gran cantidad de fósiles encontrados, se conocen los primeros organismos pluricelulares y formas de vida muy variadas por lo que no hay duda que ya existía una gran cantidad de oxígeno que permitía la vida en varias especies tanto animales como vegetales acuáticos en las diferentes profundidades del océano y de algunas especies que intercalaban tiempo de agua y de tierra, también se sabe que en ese entonces no existían las especies netamente terrestres, seguramente debido a la falta de alimentos ya que aún no había aparecido la vegetación en la superficie terrestre.

Es a partir del período Devónico¹⁹ (hace 408.000 millones de años) cuando se inicia la proliferación de plantas en la corteza terrestre que también contribuyen con la fotosíntesis y son buenas generadoras de oxígeno, aunque las especies fotosintéticas acuáticas siguen siendo las más eficientes generadoras del mismo.

Ya en el período Carbonífero, situado hace unos 360 mil millones de años, hay una gran explosión de vida tanto vegetal como animal, aparece una diversidad de especies acuáticas tanto anfibios como vertebrados y se desarrollan los reptiles a través de la evolución de los anfibios con la diferencia que estos eran totalmente terrestres. Las ciénagas y los limos eran típicos de la época y la vegetación tenía proporciones gigantescas.

Hay evidencias de que el oxígeno se estabiliza en la atmósfera a partir de entonces, con la proliferación de la vida animal, es decir durante el período Carbonífero, aunque algunos científicos piensan que este se ha ido reduciendo poco a poco desde entonces. (West, 2001).

Es importante tener en cuenta que la acumulación de oxígeno en la atmósfera y el equilibrio de ésta requiere una producción de oxígeno fotosintético mayor al consumo de oxígeno a través de la respiración aeróbica y la oxidación de elementos químicos u orgánicos, por lo que es de vital importancia mantener el equilibrio de los ecosistemas que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis.

A partir de la estabilización del oxígeno en la atmósfera, siempre ha sido posible la vida en el planeta aunque esta no haya sido siempre continua para las especies, de hecho, han habido momentos de

¹⁸El período Cámbrico está situado hace 570 millones y termina hace aproximadamente 505 millones de años. Se caracteriza por una explosión en la vida acuática. Nacen los primeros animales con concha dura y los primeros animales que combinan el agua y la tierra como medios de vida.

¹⁹ Situado hace aproximadamente 408 millones de años, se caracteriza por la proliferación de peces depredadores en los océanos y el nacimiento de diversas especies animales y vegetales terrestres.

grandes extinciones de especies, especialmente marinas, debido a sucesos relacionados con la falta de oxígeno diluido en los océanos, pero no todos estos episodios de grandes extinciones en nuestro planeta se pueden relacionar con la falta de oxígeno.

4.3.- Composición de la Atmósfera

La atmósfera se puede comparar con un océano de gases en el fondo del cual vivimos, que tiene una profundidad total de aproximadamente 600 kilómetros si no consideramos la exósfera la cual se extiende por varios miles de kilómetros hacia el espacio. Se puede clasificar por capas claramente separadas entre ellas, las mismas que en resumen y desde la superficie externa hacia la interna son las siguientes: Exósfera, Termósfera, Mesósfera, Estratósfera y la Tropósfera.

La Exósfera es considerada el límite exterior de la atmósfera dado que es la última capa donde se puede encontrar algo del gas que la conforma, se extiende por miles de kilómetros (unos 10.000 aproximadamente) y es la región atmosférica más distante de la tierra ya que se inicia a una distancia de 600 km. En este espacio, los gases más livianos se dispersan poco a poco hasta que la composición de la capa es similar al del espacio exterior y puesto que la densidad del aire es prácticamente nula, el concepto de temperatura desaparece o resulta imposible de analizar. Desde esta capa, una muy pequeña parte de los gases de la atmósfera se difunden hacia el exterior, debido a la reducción de la influencia de la gravedad, aunque esto no influye en la estabilidad de la misma. La exósfera es el espacio donde se ubican los satélites artificiales.

La Termósfera se encuentra entre la exósfera y la mesósfera, la particularidad de esta capa, que se extiende aproximadamente unos 80 km., es que la atmósfera deja de ser homogénea y la radiación ultravioleta proveniente del sol provoca la disociación y la ionización de las moléculas lo que resulta en cambios constantes de la temperatura que puede alcanzar temperaturas extremas que sobrepasan los 1000°C. También conocida como Ionósfera, esta capa cumple un rol importante en las telecomunicaciones ya que debido a su concentración de iones refleja las ondas electromagnéticas hacia la tierra, lo que permite que el receptor de las mismas se pueda encontrar a muchos kilómetros del emisor. Además de otros fenómenos atmosféricos, en esta capa se originan las Auroras boreales que se presentan generalmente en las latitudes más altas de ambos hemisferios las mismas que están causadas por la interacción de partículas de energía (electrones y protones) de los vientos solares con los átomos de ionósfera. (Treshow & Anderson, 1989); (Britannica, 2012)



Ilustración 19 Imagen de la Aurora Boreal tomadas por personal de la NASA, ISS, desde la Estación Espacial Internacional en los meses de Agosto a Octubre de 2011

La Mesósfera, se encuentra entre la Termósfera y la Estratósfera, es la capa más fría de la atmósfera donde las temperaturas bajan a medida que se alejan de la superficie terrestre llegando a valores tan bajos como -80°C , a pesar de contener solo el 0,1 % de la masa atmosférica, en la Mesósfera se pueden formar turbulencias y es la capa donde se producen los fenómenos conocidos como las estrellas fugaces, que se producen cuando un sólido cae hacia la tierra y al entrar en contacto con la Mesósfera se calienta a tal grado que se vaporiza parcial o completamente y el rastro que deja al gasificarse se ioniza y brilla.

La Estratósfera mide alrededor de 50 Km., es una región de aire muy enrarecido, donde la temperatura varía considerablemente a medida que se gana altitud, pasando desde los -55°C hasta alcanzar unos 10°C es su parte más alta. Está caracterizada por tener una mayor concentración de ozono (O_3), conocida como capa de ozono, aunque el ozono realmente se encuentra en toda la atmósfera, ésta gran concentración de O_3 es provocada por procesos fotoquímicos en las moléculas de oxígeno que se disocian y se cargan con 3 átomos de oxígeno al estar estimulados por la alta energía radiante presente en estas alturas, ubicada aproximadamente a una altitud entre 22 y 26 Km, protege a la tierra como un escudo selectivo en contra de la radiación ultravioleta al absorber los rayos de longitudes más cortas y dejando pasar exclusivamente los rayos más cercanos al espectro visible de la luz.

Es importante saber que la radiación ultravioleta está dividida en 3 grupos según la longitud de onda, las longitudes menores a 280 nm^{20} se conocen como rayos UV-C, los cuales son captados en su totalidad por el ozono estratosférico y nunca llegan a tocar la corteza terrestre, los que tienen longitudes de onda

²⁰ nm Nanómetros

entre los 280 y los 320 nm, son captados por el ozono en un 90% aunque esto puede variar según la concentración de O_3 en la estratósfera y esta es la razón por la cual la disminución de la concentración de ozono en dicha capa es muy peligrosa para los seres vivos; finalmente los rayos comprendidos en una longitud de onda entre los 320 y los 400 nm no son filtrados por el ozono llegando a la corteza terrestre.

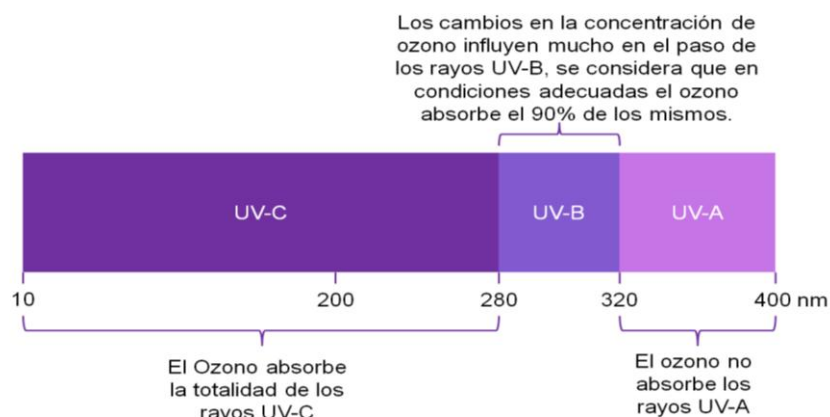


Ilustración 20.- Clasificación de los rayos ultravioletas según la longitud de onda y la absorción de los mismos por el ozono, (Elaboración propia)

Una parte de los rayos ultravioletas son de vital importancia para los seres vivos puesto que intervienen en la función fotosintética de las plantas y las algas y, en el caso de los animales y el ser humano, intervienen en la síntesis de la vitamina D, vital para el desarrollo equilibrado de los huesos de todos los vertebrados.

Sin embargo sin la protección de la estratósfera y la gran concentración de ozono en la misma, la vida no sería posible en el planeta pues la mayoría de los rayos ultravioletas son altamente dañinos para los seres vivos, ya que tiene el potencial de interrumpir los procesos moleculares, incluyendo la formación del DNA, la clorofila y otros pigmentos de plantas y proteínas. A nivel de los hábitats acuáticos puede causar graves daños al reducir la biomasa de las algas microscópicas como las algas verdes, las diatomeas y otras. (Treshow & Anderson, 1989). En el caso del ser humano tiene graves efectos sobre la piel y los ojos siendo la causa principal de cáncer de piel y ceguera por exposiciones extremas al sol.

Si bien la concentración de ozono varía cíclicamente por efectos de la temperatura, se sabe que la propagación masiva de algunos químicos como los clorofluorocarbonos, relacionados con la industria de la refrigeración y los aerosoles, ha tenido como consecuencia la reducción del ozono en la estratósfera, provocando lo que se ha llamado el agujero de la capa de ozono, lo cual, como se ha visto, puede tener efectos altamente peligrosos para la vida en el planeta.

La Tropósfera, tienen una extensión variable pasando de los 9 Km. de alto en los polos hasta los 19 Kms. de alto en el ecuador. Esta es la capa que tiene mayor importancia par eeste trabajo al ser la que contiene el aire que respiramos y donde ocurren todos los fenómenos climáticos que afectan nuestra vida como son los vientos, las nubes, las lluvias, los huracanes, los cambios de temperatura, etc.

Dentro de la tropósfera, que incluye nuestro espacio vital, la temperatura varía a medida que aumenta la altitud de la misma, siendo más cálida en las zonas más bajas, es decir a nivel del mar donde la temperatura puede alcanzar más de 38°C y más fría en los niveles más altos donde llega a un extremo de -70°C en la tropopausa. Aunque la temperatura no solo está relacionada con la altura, ya que en ella influyen otros factores como la latitud y el grado de saturación del aire, se puede decir que en una misma latitud la temperatura decrece 1°C cada 200 ms. de altura aproximadamente cuando el aire está saturado; cuando el aire está seco, puede llegar a bajar en el rango de 1°C cada 100 ms. De altura.

La tropósfera es la capa más densa de la atmósfera pues es donde se concentra la mayor cantidad de los gases que la conforman así como casi todo el vapor de agua, es el lugar donde ocurren los ciclos biogeoquímicos que mantienen el equilibrio del planeta y la vida por lo que, aunque es realmente muy fina en comparación con la masa sólida de la tierra (Ver Ilustración 21), constituye el espacio esencial para la vida.



Ilustración 21.- Imágenes tomadas por personal de la NASA, ISS, desde la Estación Espacial Internacional en los meses de Agosto a Octubre de 2011, se puede apreciar el grosor de la atmósfera sobre el planeta. Se observa tanto el mar como áreas continentales

Es necesario tener en cuenta que el ser humano afecta a esta capa con todas y cada una de sus actividades por lo que es muy importante evitar los agentes que la destruyen y potenciar aquellos que tienden a mantenerla en equilibrio.

4.4.- Presión atmosférica.-

Como hemos visto, la tropósfera tiene un espesor de 18 Km. en el ecuador y 9 Km. en los polos, al ser esta capa la más densa de toda la atmósfera es también la más pesada y su peso, sumado al peso de las demás capas atmosféricas, ejerce una presión sobre la superficie terrestre, la misma que se conoce como presión atmosférica.

La presión atmosférica ejercida sobre la Tierra, varía según donde se mida ya que depende de varios factores, sin embargo dada la densidad y el peso de la tropósfera, la altitud del lugar será el factor que más influya en los cambios de presión ya que a mayor altura tendremos menor presión atmosférica y a menor altura tendremos mayor presión atmosférica. (Ilustración 22)

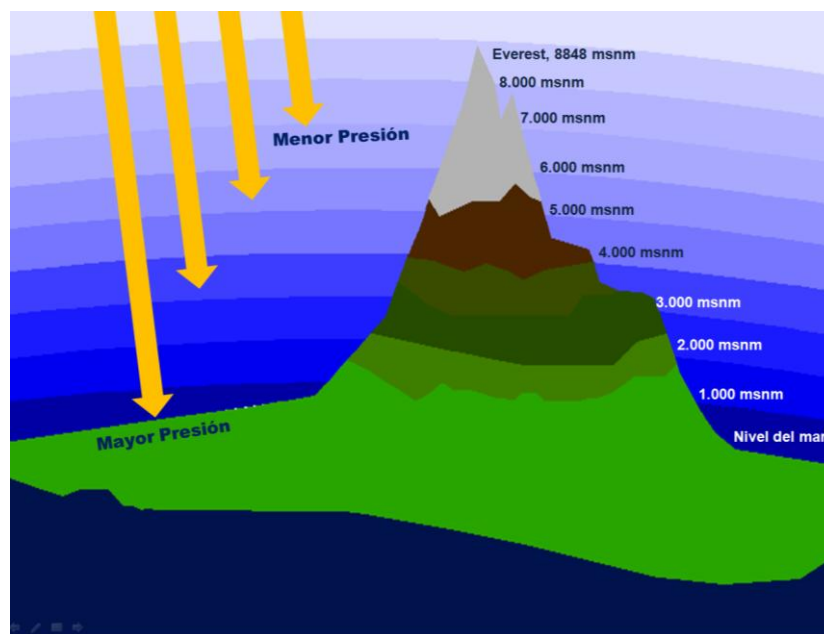


Ilustración 22.- La presión atmosférica ejercida sobre la superficie terrestre, las flechas amarillas indican mayor o menor presión según la altura donde se midan. (Elaboración propia)

La razón de esto es porque a medida que nos elevamos en altura hay menos cantidad de aire sobre nosotros por lo que el peso es menor. Por ejemplo, si alguien se encuentra en el Ecuador al nivel del mar tendría una presión equivalente al peso de aproximadamente 18 Km. de tropósfera, mientras que si estuviera a una altitud de 3000 msnm, tendría una presión equivalente a solo 15 Km. de tropósfera.

Ahora bien, la relación entre la altura y la presión atmosférica no es lineal puesto que la atmósfera está conformada por gases y estos se expanden a mayor temperatura y se comprimen a menor temperatura, por lo que resulta una relación logarítmica en la que es necesario tomar en cuenta varios factores.

Con el objeto de comprender mejor este hecho y de determinar las presiones de oxígeno en la cual viven los habitantes de las diferentes ciudades debemos realizar los cálculos de la presión atmosférica, densidad y presión de oxígeno que para cada altitud los valores serán diferentes. A continuación se presenta el cálculo para la mayoría de las ciudades ubicadas en altura. Para lograr ello es necesario remitirse a la Ley de los gases Ideales:

$$PV=nRT$$

Donde: P= Presión; V= Volumen; n= número de moléculas gramo del gas (en este caso del aire), R= constante general de los gases
T= Temperatura absoluta (en °K)²¹

Si el espesor de la atmósfera y la fuerza gravitacional o la temperatura fueran iguales en todo el planeta , no habría ningún problema y encontrar la presión atmosférica de cualquier lugar sería un cálculo sencillo, pero el espesor de la atmósfera varía, siendo en el ecuador de 18 kms, y en los polos de 9 kms, por otro lado, la temperatura varía constantemente y la fuerza gravitacional también siendo en los polos de 9.8320 m/s² y menor en el ecuador (9.7803 m/s²) (Fuentes Freixanet, 2010)

Entonces tenemos que para el cálculo de la presión atmosférica en cualquier lugar del mundo debemos remitirnos a varios factores como la altitud, la fuerza de gravedad y la temperatura del lugar. Para simplificar el cálculo y lograr valores lo más cercanos a la realidad, se ha utilizado la siguiente fórmula

$$P_1=P_0/EXP (Z*g/(R*T_m))$$

Donde:

P₁=Presión a una altitud de Z metros; P₀= Presión a nivel de la superficie, (nivel del mar = 760 mmHg); Z= Altitud nivel de Presión P₁; g= aceleración de la gravedad= 9.80617 m/seg²; R=Constante de los gases= 287.04 m²/seg² (En este caso se asume la Constante específica para aire seco R= 287.04 JKg⁻¹K⁻¹ y se ha reemplazado J=Kg.m²/s²); T_m= Temperatura media entre los niveles de presión P₁ y P₀= (T₀+T₁)/2 y T₁=T₀-γ*Z. Donde γ= gradiente Térmico vertical (0.65°C/100m) y T₀ = temperatura de superficie (15°C=288°K); P₀= 760mmHg

Esta fórmula sirvió para elaborar el cuadro de presiones atmosféricas a cada 100 metros de altitud que aparece en la ilustración 23.

²¹ Para calcular los °K se debe sumar la temperatura del lugar (p. ejemplo=25°) a los °K, es decir: 273°K+25°C= 298°K

De donde:

$$P_1 = 760 / \text{EXP}^{(Z / (8430.15 - Z * 0.09514))}$$

Altitud msnm	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	760	751	742	733	725	716	707	699	691	682
1,000	674	666	658	650	642	634	626	619	613	604
2,000	596	589	582	574	567	560	553	546	539	533
3,000	526	519	513	506	500	493	487	481	474	468
4,000	462	456	450	445	439	433	427	422	416	411
5,000	405	400	395	389	384	379	374	369	363	359

Ilustración 23.-Tabla de presiones atmosféricas, en la columna de la izquierda se muestran los millares y en la línea superior los cientos. (Larocca, 2011),

Se puede utilizar la misma fórmula para conocer la Presión Atmosférica de algunas de las Ciudades más altas del mundo, y tenemos que:

Lugares	Altura	Presión
	estimada	Atmosférica
	msnm	(mmHg)
Nivel del mar	0.00	760
Ciudad de México	2,300	574
Adis Abeba, Etiopía	2,500	560
Toluca México	2,680	548
Bogotá, Colombia	2,680	548
Dege, China	3,100	519
Cuzco, Perú	3,400	500
La Quiaca, Argentina	3,440	497
Namche Bazaar, Nepal	3,450	496
Apartaderos, Venezuela	3,505	493
La Paz, Bolivia	3,650	484
Lhasa, Tibet	3,650	484
Huancavelica, Perú	3,680	482
Oruro, Bolivia	3,700	481
Puno, Perú	3,850	471
El Alto, Bolivia	4,000	462
Potosí, Bolivia	4,100	456
Cerro de Pasco, Perú	4,350	442
Wenchuan, China	5,000	405
La Rinconada, Perú	5,100	400

Ilustración 24.-Tabla de presiones atmosféricas para algunas de las ciudades más altas del mundo. Elaboración propia basada en la altura de algunas de las ciudades más altas del mundo y la fórmula anterior (Larocca, 2011). Se ha resaltado la ciudad de La paz, Bolivia al ser ésta la ciudad donde se realiza la propuesta del presente trabajo.

Se ha comprobado que evidentemente a mayor altitud, menor presión atmosférica pero eso no parece decir mucho sobre la calidad de la atmósfera, especialmente no en cuanto a la cantidad de oxígeno que esta contiene. Podemos conocer este dato a través de la densidad del aire, que al igual que la presión atmosférica va disminuyendo conforme aumenta la altitud. La densidad del aire se puede calcular según la siguiente fórmula, misma que toma como referencia la altitud que generalmente es un dato conocido:

$$\rho = 1.225 \text{EXP}^{((-Z/8.435)-((T-15)/288.15))}$$

Donde: ρ = densidad del aire estimada (Kg/m^3); 1.225= densidad del aire húmedo a presión de 1 atm. (Kg/m^3); T= temperatura media ($^{\circ}\text{C}$); Z= Altitud del lugar (msnm); 760mmHg= Presión atmosférica media a nivel del mar; 8.435= escala de altitud para 15°C (m); 288.15= Temperatura absoluta de referencia, sobre el nivel del mar ($+15^{\circ}\text{C}+273.15=288.15\text{K}$). (Fuentes Freixanet, 2010)

Aplicándola a las ciudades más altas tendremos que:

Lugares	Altura estimada msnm	Presión Atmosférica (mmHg)	Densidad del Aire Invierno= 10°C en Kg/m^3	Densidad del Aire Verano= 20°C en Kg/m^3
Nivel del mar	0.00	760	1.24	1.20
Ciudad de México	2,300	574	0.95	0.92
Adis Abeba, Etiopía	2,500	560	0.93	0.90
Toluca México	2,680	548	0.91	0.88
Bogotá, Colombia	2,680	548	0.91	0.88
Dege, China	3,100	519	0.87	0.83
Cuzco, Perú	3,400	500	0.84	0.80
La Quiaca, Argentina	3,440	497	0.83	0.80
Namche Bazaar, Nepal	3,450	496	0.83	0.80
Apartaderos, Venezuela	3,505	493	0.83	0.79
La Paz, Bolivia	3,650	484	0.81	0.78
Lhasa, Tibet	3,650	484	0.81	0.78
Huancavelica, Perú	3,680	482	0.81	0.78
Oruro, Boliva	3,700	481	0.81	0.78
Puno, Perú	3,850	471	0.79	0.76
El Alto, Bolivia	4,000	462	0.78	0.75
Potosí, Bolivia	4,100	456	0.77	0.74
Cerro de Pasco, Perú	4,350	442	0.75	0.72
Wenchuan, China	5,000	405	0.69	0.67
La Rinconada, Perú	5,100	400	0.69	0.66

Ilustración 25.- Elaboración propia, densidad del aire en algunas de las ciudades más altas del mundo.

4.6.- Composición del Aire

Hasta aquí se ha visto tanto la presión atmosférica como la densidad del aire pero aún no tenemos un dato específico que demuestre que el aire en zonas de altura no es adecuado, solo conocemos el hecho que se tiene menor presión atmosférica y que el aire es menos denso. Para conocerlo más a fondo y entender el porqué el nivel de oxígeno en las zonas de altura no es adecuado, se tiene que conocer la composición del aire.

La mayoría de los autores asumen una composición del aire que normalmente está dividida de la siguiente manera: 78% de nitrógeno, 20.99% de oxígeno, 0.93% argón, 0.03 bióxido de carbono, hidrógeno 0.01% y el 0.01% restante está conformado por otros gases. (Littlejohn & Meenaghham, 1959)

Composición del Aire

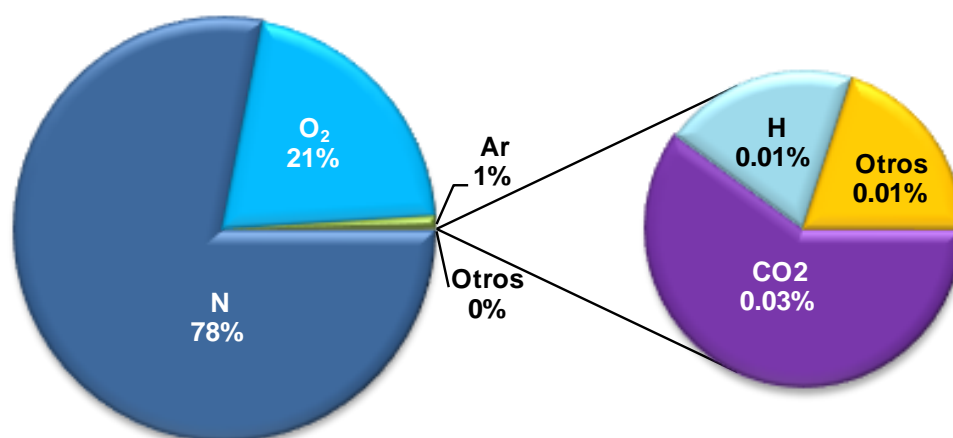


Ilustración 26.- Composición del aire, elaboración propia según datos de Littlejohn & Meenaghham, (1959)

Se entiende que dicha composición es del aire seco, sin embargo es importante indicar que el vapor de agua está siempre presente en la atmósfera con un rango que va desde casi 0 a casi 7%, dependiendo de la temperatura y otros factores, por lo que tendría que ser tomada en cuenta aunque generalmente no lo es. (Treshow & Anderson, 1989)

Para el presente trabajo es suficiente saber que el aire contiene aproximadamente 21% de oxígeno, lo cual nos ayudará a calcular la presión de O₂ en un lugar determinado simplemente calculado el 21% de la presión total del aire en ese lugar, por ejemplo, si en la Ciudad de La Paz la Presión atmosférica es de

484 mmHg, la presión de oxígeno (PO_2) en dicha ciudad, será de 102 mmHg. Es importante notar que a nivel del mar, la PO_2 es de 160 mmHg.

Por otra parte, si se quiere conocer la cantidad de oxígeno en el aire, es decir la densidad parcial de O_2 , una vez conocida la densidad del aire del lugar se calcula el 21% con respecto a esta última, solo que en este caso es necesario que esté referenciada a una temperatura, puede ser por ejemplo la temperatura media de invierno o de verano, ya que los valores de densidad se verán muy influenciados por la temperatura. A continuación se detalla tanto la PO_2 como la densidad de O_2 (en Kg/m^3) para diferentes ciudades ubicadas en altura, enfatizando en la Ciudad de La Paz, Bolivia, objeto de nuestro estudio:

Lugares	Altura estimada msnm	Presión Atmosférica (mmHg)	Presión Parcial de O_2 mmHg	Densidad del Aire Invierno=10°C en Kg/m^3	Densidad del Aire Verano=20°C en Kg/m^3	Cantidad de O_2 en el aire Invierno Kg/m^3	Cantidad de O_2 en el aire Verano Kg/m^3
Nivel del mar	0.00	760	160	1.24	1.20	0.26	0.25
Ciudad de México	2,300	574	121	0.95	0.92	0.20	0.19
Adis Abeba, Etiopía	2,500	560	118	0.93	0.90	0.19	0.19
Toluca México	2,680	548	115	0.91	0.88	0.19	0.18
Bogotá, Colombia	2,680	548	115	0.91	0.88	0.19	0.18
Dege, China	3,100	519	109	0.87	0.83	0.18	0.18
Cuzco, Perú	3,400	500	105	0.84	0.80	0.18	0.17
La Quiaca, Argentina	3,440	497	104	0.83	0.80	0.17	0.17
Namche Bazaar, Nepal	3,450	496	104	0.83	0.80	0.17	0.17
Apartaderos, Venezuela	3,505	493	104	0.83	0.79	0.17	0.17
La Paz, Bolivia	3,650	484	102	0.81	0.78	0.17	0.16
Lhasa, Tibet	3,650	484	102	0.81	0.78	0.17	0.16
Huancavelica, Perú	3,680	482	101	0.81	0.78	0.17	0.16
Oruro, Bolivia	3,700	481	101	0.81	0.78	0.17	0.16
Puno, Perú	3,850	471	99	0.79	0.76	0.17	0.16
El Alto, Bolivia	4,000	462	97	0.78	0.75	0.16	0.16
Potosí, Bolivia	4,100	456	96	0.77	0.74	0.16	0.16
Cerro de Pasco, Perú	4,350	442	93	0.75	0.72	0.16	0.15
Wenchuan, China	5,000	405	85	0.69	0.67	0.15	0.14
La Rinconada, Perú	5,100	400	84	0.69	0.66	0.14	0.14

Ilustración 27.- Cantidad de Oxígeno (Kg/m^3) en el aire según la altura, Presión atmosférica y la densidad en algunas de las ciudades más altas del mundo, elaboración propia.

Como se puede observar, la cantidad de oxígeno en el aire se reduce en la medida en que la altura se incrementa, por ejemplo, a nivel del mar hay 0.25 Kg/m^3 de O_2 en el aire en cambio en La Paz, Bolivia, ubicada sobre los 3650 msnm hay solo 0.16 Kg/m^3 , y en la Rinconada, Perú apenas hay 0.14 Kg/m^3 .

Es importante observar que en la práctica estos valores están influenciados tanto por la temperatura como por la humedad que varían constantemente, por lo que estas cifras son relativas, pero nos ayudan

a tener una idea bastante acertada de cómo la cantidad de oxígeno se va reduciendo a medida que se incrementa la altitud.

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la calidad del aire en zonas de altura, como la Ciudad de La Paz, Bolivia, dependen de la cantidad de O_2 en el mismo y los cálculos realizados muestran como el O_2 decrece proporcionalmente a la altitud del lugar, por lo que se plantea analizar si el bajo nivel de confort en zonas de altura en relación a la calidad del aire pudiera solucionarse a través de un incremento controlado de este gas en los ambientes interiores en los cuales los seres humanos pasamos la mayor parte de nuestro tiempo.

En el capítulo dedicado a la vida en altura, se ha visto que todos los seres vivos se ven afectados por esta falta de oxígeno en el aire y se han detallado las enfermedades o malestares que sufren los seres humanos por esta causa incluso desde antes de nacer, en el período de gestación, hasta la edad madura.

También se ha visto que la carencia de O_2 en el aire también afecta al desarrollo de las plantas por lo que las zonas de altura suelen ser mucho más áridas que las zonas bajas aunque sean soleadas y estén ubicadas en latitudes tropicales, lo cual provoca una escases tanto de alimentos como de energéticos en dichas zonas.

Por tal motivo, y tomando en cuenta que son las microalgas los organismos más eficientes en la producción de O_2 , a continuación se intentará conocer a estos microorganismos para ver la posibilidad de que formen parte de la solución al problema del confort respiratorio y la calidad de aire en zonas de altura.

Capítulo 5

5.- Las algas

Desde hace varias décadas, se ha iniciado una línea de investigación relacionada con las algas y las micro algas debido a la gran variedad de productos derivados de las mismas que son de utilidad para el ser humano como son la producción de proteínas que pueden ser utilizadas en la alimentación, para la industria farmacéutica o la medicina y la producción de lípidos que pueden derivar en biocarburantes y otras aplicaciones.

Además de los productos que nos ofrecen, la razón por la cual las algas están concentrando la atención de investigadores de muchas áreas de conocimiento es que dan importantes soluciones medioambientales, por ejemplo la fitoremediación de aguas residuales con algas es una práctica común en muchos países desarrollados, por otra parte, la captura de CO₂, de sulfuros y/o de metales pesados hacen que el cultivo de algas sea de suma importancia para la humanidad y el planeta entero.

Aunque una gran parte de las investigaciones están concentradas en el cultivo de microalgas como fuente de biocarburantes ya que se estudia la posibilidad de desplazar los combustibles fósiles a favor de los biocombustibles, la realidad es que la variedad de productos y soluciones que ofrecen los cultivos de microalgas es demasiado grande y demasiado rápida como para no tomarla en cuenta.

La posibilidad, además, de cultivar microalgas en zonas urbanas, donde se concentra la gran mayoría de la población y se concentran los problemas medioambientales, en vez de utilizar otros terrenos puede significar un giro en la historia del planeta y de la forma como se relaciona la humanidad con este ya que podría ser la solución a la independencia energética y nutricional de las urbes.

En el presente capítulo, se realizará un acercamiento al complejo mundo de las algas lo que permitirá conocerlas lo suficiente para proponer el sistema de cultivo de microalgas y recuperación del oxígeno producido. Al no ser este un trabajo de biología solo se abordarán sus características básicas y todo aquello que nos sirva para el objetivo principal de la presente tesis.

5.1.- Definición

Alga es una palabra latina que significa, hierba del mar. Según el diccionario etimológico, la palabra Alga se refiere a un "Organismo autótrofo²² de organización sencilla, que hace fotosíntesis, por lo tanto es productora de oxígeno y que vive en el agua o en ambientes muy húmedos. Las algas pueden ser unicelulares o haber desarrollado anatomías pluricelulares complejas" (Cortés Gabaudan & Ureña Bracero, 2011), pertenecen al reino Protista²³, reino que aún no está del todo definido ya que abarca una serie de organismos que no pueden ser catalogados dentro de los reinos animal, plantae o fungi, engloba a organismos que no presentan tejidos ni órganos diferenciados y actualmente no se clasifican como vegetales, aunque durante mucho tiempo y hasta hace muy poco eran considerados como tales ya que comparten con estos la capacidad fotosintética.

Para algunos autores las algas se definen como el "conjunto de los vegetales²⁴ eucariotas²⁵ fotosintéticos que representan un grupo heterogéneo y muy amplio de líneas evolutivas entre las cuales hay muy pocas similitudes". Presentan una gran variedad de estructuras y tamaños, se pueden encontrar algas microscópicas, llamadas microalgas, que no sobrepasan los 2 -3 μm así como las macro algas que en algunos casos pueden sobrepasar los 80 metros de longitud.

Se diferencian claramente de los hongos (del reino fungi) precisamente por presentar plastos y clorofila, de los que los hongos carecen²⁶ por lo que ni tienen capacidad fotosintética. Las algas presentan casi todos los tipos de reproducción así como tipos de ciclos de desarrollo. Las características esenciales que distinguen a éstas del resto de los vegetales fotosintéticos se basan en la naturaleza de sus órganos reproductores que producen esporas o gametos.

5.2.- Reproducción y ciclos de vida

El ciclo de vida de las algas está marcado por los periodos que caracterizan a todos los seres vivos, nacimiento, crecimiento, reproducción y muerte. En el caso de las algas está directamente relacionado con la forma de reproducción que puede ser sexual, asexual o mixta.

Las algas presentan varios tipos de reproducción, de hecho una de las características de estas es que alternan los ciclos de reproducción sexual con aquellos asexuales aunque en algunos casos se han

²² Autótrofo se refiere a la capacidad innata de un organismo de crear sus propios nutrientes a través de elementos inorgánicos

²³ Protista: *Protist* de gr. *prōtistos* πρῶτιστος [*prōt(o)*- πρῶτος gr. 'primero', 'previo' + *-ist-os/-ist-ē* gr. 'muy'] Se usa este vocablo para designar a seres de estructura más simple, protozoos, protofitos.

²⁴ En el momento de la edición del libro citado se consideraba a las algas como parte del reino vegetal. (n.del a.)

²⁵ Eucariotas: Tipo de células caracterizado por presentar el material genético organizado en cromosomas, encerrado en un núcleo celular que presenta doble membrana de las que evolucionaron todos los reinos vivos del planeta.

²⁶ Entre las algas existen grupos reducidos que carecen de plastos y pueden realizar la fotosíntesis pero comparten una serie de otras características con ellas.

encontrado ciclos continuos de reproducción vegetativa o asexual ya sea por esquejes o producción de propágulos²⁷.

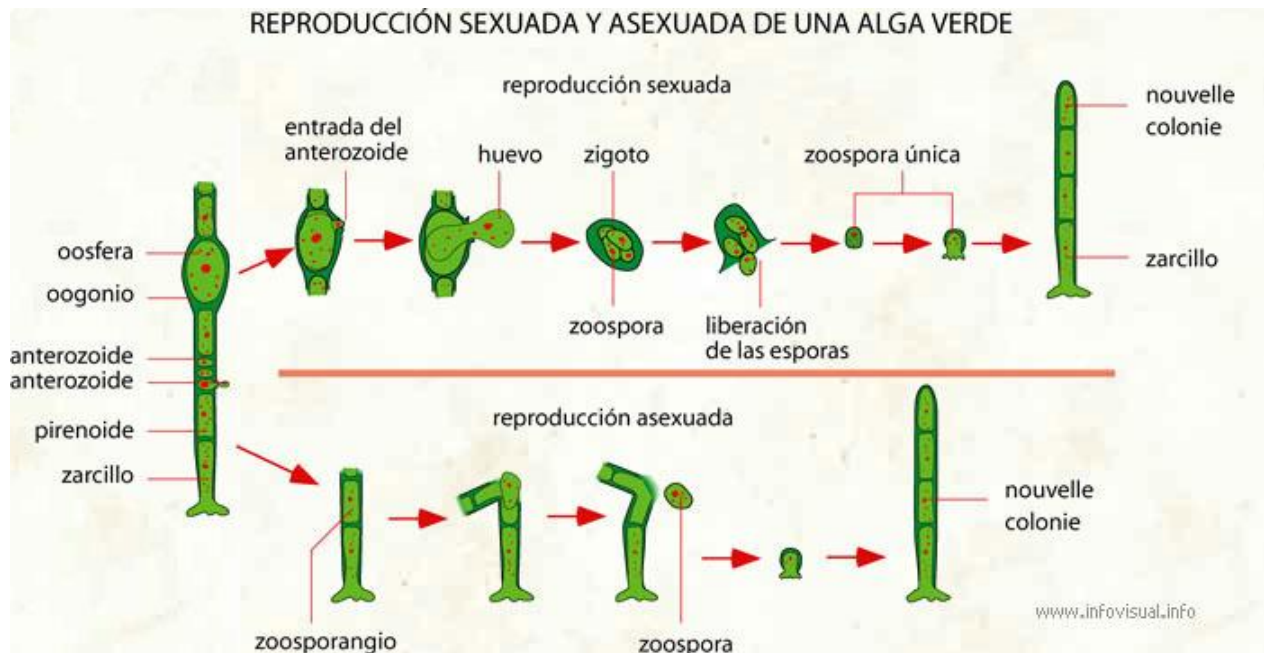


Ilustración 28.- Forma de reproducción combinada, asexual y sexual (Dery, 2005, 2011)

Las algas que se reproducen asexualmente simplemente pueden reproducirse por fragmentación, es decir que "se rompen" formando nuevas criaturas similares a las originales, un ejemplo típico de esta forma de reproducción se da en las algas con forma de hebras o filamentos las cuales, cuando llegan a su tamaño máximo, se fragmentan en pequeños trozos y cada uno de estos crece independiente hasta alcanzar el tamaño adulto para luego volver a fragmentarse.

La reproducción sexual se inicia con la formación del cigoto que germina, crece y se desarrolla y crea nuevos gametos femeninos y masculinos que al unirse forman nuevos cigotos y completan un ciclo sexual.

En el caso de alternancia de ciclos; empieza con el cigoto que se asienta en el fondo del mar, germina, crece, se desarrolla y se transforma en una planta en la cual se forman los esporangios que a su vez contiene las zoosporas. Estas se sueltan, nadan libremente hasta llegar al fondo del mar completando un ciclo asexual. Al germinar, las zoosporas se desarrollan en 2 tipos de filamentos que al madurar producen

²⁷ Los propágulos son estructuras celulares que se desprenden de la planta madre para crear nuevas plantas idénticas a la madre de manera asexual típicas en plantas superiores como en algas y otras especies.

gametos, uno de los filamentos produce gametos femeninos y el otro gametos masculinos. Estos gametos se sueltan, se atraen y se unen, uniendo su núcleo y transformándose en un nuevo cigoto que se asienta en el fondo del mar terminando el ciclo sexual.

El cigoto es capaz de sobrevivir a las condiciones más difíciles durante las cuales puede mantenerse en el mismo estado sin germinar hasta encontrar condiciones favorables, entonces germina, crece e inicia una nueva generación o ciclo de vida.

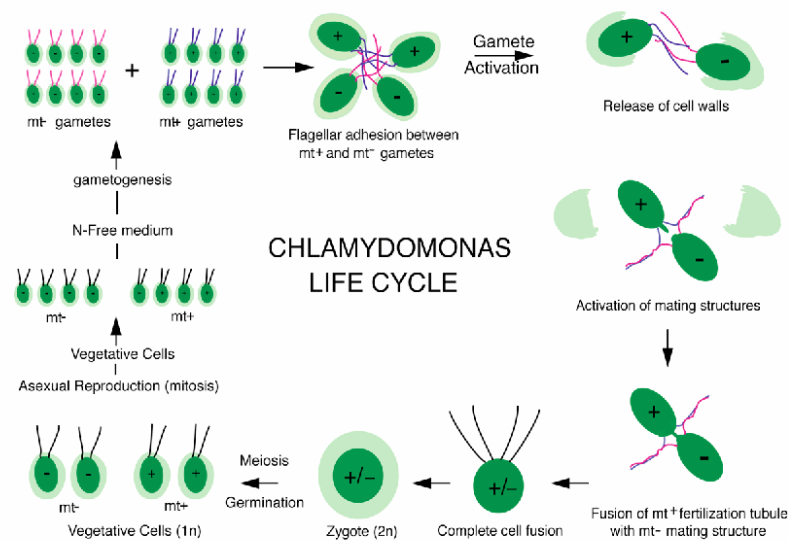


Ilustración 29.- Ciclos de reproducción de la Chlamidomona

5.3.- Clasificación

Las algas se dividen en grandes grupos o líneas evolutivas, con pocos elementos comunes entre sí, éstas suelen ser muy diferentes unas de otras y no se considera que tengan algún parentesco biogenético. (Abbeyes et al., 1989)

Tanto desde el punto de vista morfológico como desde el bioquímico o el citológico, las algas presentan una diversidad muy grande por lo que el clasificarlas es una tarea sumamente compleja. Aunque se puede seguir la evolución morfológica de las algas en su conjunto, en lo que se refiere a las estructuras celulares, a la naturaleza de sus pigmentos fotosintéticos y a los productos de los diferentes metabolismos, se encuentran diferencias considerables por lo que son estos los elementos que toman mayor importancia a la hora de lograr la clasificación de las mismas, dichos elementos representan a su vez los diferentes filum de evolución. (Abbeyes et al., 1989)

Tomando en cuenta estas características, podemos clasificar a las algas en los siguientes grupos:

- ✓ **Algas rojas o Rodófitas** La mayoría de estas algas son marinas, presentan características morfológicas muy variadas, se caracterizan por la presencia de sinapsis entre sus células; el hecho de carecer de células flageladas, y de que, cuando existe la reproducción sexual, se realiza a través de gametos inmóviles, su forma de reproducción combina la fase asexual con la sexual, su ciclo suele ser tri genético diplohalofásico o di genético heteromorfo. Los productos de su metabolismo son el almidón, en las florídeas, y el heterópsidos de glicerol (ácido glicérico). Sus plastos presentan coloración roja por las ficobiliproteínas.



Ilustración 30.- Algas rojas o rodófitas

- ✓ **Cromófitas:** Pirroficófitas, Crisoficófitas y Feoficófitas de color amarillo, dorado o pardo. El conjunto de algas cromófitas es más complejo que las anteriores, suelen haber grandes grupos de forma unicelulares flageladas, se caracterizan por tener plastos de color pardo, amarillo o dorado, gracias a sus pigmentos carotenoides y carecer, en la mayoría de los casos, de clorofila b, aunque a veces presentan clorofila c. Ausencia de verdadero almidón sustituido por otras sustancias, (amiláceas, polisacáridos, extraplastidiales).



Ilustración 31: Algas feoficofitas pardas (Cubas, 2008)

- ✓ **Algas verdes o clorofitas** con plastos coloreados de verde y tienen en común con las plantas algunas características tanto citológicas como bioquímicas que hace que se las considere dentro de del mismo gran “phylum”²⁸ : el de las Clorofitas. Las clorofitas, tienen en común ciertos caracteres bioquímicos y citológicos; contienen plastos verdes con pigmentos de clorofila a y b y algo de carotenoides, aunque estos no llegan a influir en el color verde dado por la clorofila en los plastos, hay presencia generalizada de almidón, considerado el almidón verdadero que se forma ya sea en los cloroplastos o en los leucoplastos especializados. Se distinguen de los vegetales superiores porque su aparato vegetativo es mucho más simple, por la naturaleza de sus órganos reproductores consistentes en gametocistos y esporocistos. Presentan mucha variedad en sus formas de reproducción así como sus ciclos de desarrollo

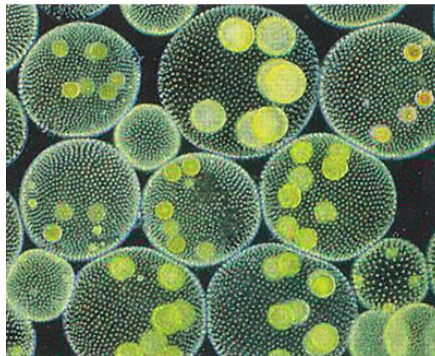


Ilustración 32.- Algas Clorofitas <http://biologialatina.blogspot.com/2009/02/reino-protista.html>

²⁸ Filum: Término empleado en (Abbeyes et al., 1989) para designar grandes grupos que reúnen líneas evolutivas, el autor admite que aunque no esté dentro de las Reglas Internacionales de la nomenclatura botánica, la utilización del término es útil para la reagrupación de varias divisiones que comparten ciertos aspectos citológicos y bioquímicos como son las clorofitas y cromofitas.

5.4.- Hábitat

Las algas tienen un papel primordial en los medios acuáticos en los que, gracias a su potencialidad fotosintética, son las principales responsables de la producción de alimentos y representan el primer eslabón en la cadena alimenticia. El agua en el que se desarrollan puede ser dulce o salada, es decir océanos, mares, lagos, estanques, charcos, ríos, manantiales y pantanos.

Resumir el hábitat de las algas es una tarea compleja ya que éstas son capaces de poblar los más diversos biotopos, es decir que están casi en todas partes, la gran mayoría de las algas viven en el agua aunque hay muchas que tienen más bien un carácter terrestre y algunas son aéreas y otras son endófitas que viven en los tejidos vegetales o animales, aunque siempre están relacionadas con un nivel de humedad bastante alto.

Para facilitar el trabajo complejo de clasificación según el hábitat, se han dividido en dos grandes grupos, el primero se refiere a las Algas Marinas, que, como lo dice su nombre, pertenecen a este grupo aquellas algas que viven en el mar o los océanos de cualquier parte del planeta y el segundo agrupa a las algas continentales, es decir a todas aquellas algas de agua dulce, las aguas termales, la nieve de las regiones polares o alpinas y todos los biotopos terrestres.

Algas Marinas



Ilustración 33.- Algas acuáticas (Visión Marítima, 2011)

El océano llega a tener profundidades de hasta 10.000 m., a las que la luz solar no llega; dado que las algas son organismos fotosintéticos y necesitan de la luz para vivir, solo pueden hacerlo en profundidades en las que haya cierta intensidad de luz solar, zona que se conoce con el nombre de región fótica y que se extiende hasta un máximo de 200 m. en zonas oceánicas muy claras. Se considera que más allá de este límite, viven exclusivamente seres heterótrofos, sin capacidad fotosintética que estarían dentro de la clasificación de animales, hongos o bacterias.

La mayoría de las algas de aguas profundas llamadas bentónicas o bénticas, no viven más allá de los 180 m. de profundidad y éstas últimas suelen ser muy grandes precisamente porque necesitan tener mayor capacidad de captación de la luz solar. Están zonificadas según la profundidad del hábitat y por tanto según la cantidad de luz que reciben, al respecto se sabe que las algas rojas tienen mayor capacidad para vivir en mayores profundidades que las verdes.

En el agua proliferan también las algas microscópicas, éstas forman parte del dominio pelágico, es decir que nadan o flotan en suspensión en el agua, en contacto directo con la luz solar y forman el fitoplancton, compuesto por multitud de especies que comprende un amplio grupo de organismos fotosintéticos de los cuales nos ocuparemos con mayor detalle que las bénticas ya que son estas microalgas las que nos interesan en la presente tesis.

Los diversos organismos que forman el fitoplancton se pueden categorizar según el tamaño de los mismos, como se detalla a continuación:

- ✓ Microplancton: Comprende organismos que miden entre 50 y 500 μm . Las más grandes pueden ser las Diatomeas grandes y las Dinoficeas (Peridíneas), así como alguna Prasinoficea.
- ✓ Nanoplancton comprende a los organismos que tienen entre 10 y 50 μm e incluye a las Diatomeas pequeñas, Crisoficeas y Criptoficeas.
- ✓ Ultraplancton que comprende a los organismos mucho más pequeños aún entre 0,5 y 10 μm , entre las que se cuentan pequeñas Crisoficeas y Bacterias.

Para entender la gran importancia del fitoplancton diremos solamente que en un metro cúbico de agua del mar báltico se pueden contar 130 millones de Diatomeas y 13 millones de Peridíneas. En el caso del Nanoplancton los datos son mucho más impresionantes ya que, por ejemplo, en las costas de Noruega se han podido contar 35 millones de Cocolitoforáceas por litro de agua. (Abbeyes et al., 1989)

La profundidad a la que suele encontrarse fitoplancton es relativamente reducida y depende en general de las condiciones de la densidad de las masas de agua, de la temperatura y el grado de salinidad de la misma. Uno de los elementos que más influye en el desarrollo del fitoplancton son las estaciones ya que de ellas depende tanto la temperatura del agua como la cantidad de nutrientes necesaria para el desarrollo de las microalgas. Las épocas de mayor proliferación son la primavera época en la que se desarrollan tanto que llegan a provocar un empobrecimiento de las sales marinas bastante alto, luego el verano, una vez remineralizado el medio con fósforo y nitrógeno especialmente por acciones bacteriales, el fitoplancton vuelve a proliferar. Sin embargo se puede decir que en general en los inviernos proliferan más las Diatomeas y en verano las Peridíneas.

En cuanto a su ubicación geográfica, es importante aclarar que las algas crecen en todas partes del planeta, aunque se ha podido determinar, especialmente en las bénticas diversos hábitats repartidos en función a la temperatura del mar, éstas son la zona ártica, boreal, templada norte, tropical, templada sur, austral y antártica. (Abbayes et al., 1989), pero en cada una de estas zonas hay diversidad de géneros y especies.

En cuanto a las algas planctónicas tienen una amplia distribución, y simplemente se distinguen especies de mares fríos y cálidos que en general suelen coexistir en los mares templados.

Algas Continentales

Como se ha explicado anteriormente, las algas continentales son todas aquellas que habitan en medios diferentes al marino, ya sean de agua dulce, de suelo o de aire, mientras no pertenezcan a los océanos, están dentro del grupo de algas continentales.

Como son seres hidrófilos, las algas se reproducen sobre todo en medios acuáticos y en el caso de las algas continentales no es diferente. En las aguas dulces también existen las algas bénticas y las algas planctónicas y en general todo aquello que aplica para los medios marinos, podría aplicarse a los medios de agua dulce, aunque éstas presentan grandes diferencias con el agua de mar en cuanto a sales y nutrientes se refiere, por lo que es necesario clasificar el tipo de agua donde las mismas pueden crecer.

- **Las aguas oligotróficas** se conocen como aquéllas de los lagos de las zonas montañosas, que se forman con aguas de manantiales derivados de la fusión de las nieves. Aunque suelen ser neutras o alcalinas y contienen muy poca biomasa dado que presentan muy pocos nutrientes en lo que a fosfatos y nitratos se refiere, existen especies de algas que se desarrollan en las mismas como son las Crisoficeas, Diatommofoceas y especialmente las Desmidiales.

- **Las aguas eutróficas** son aquellas que siendo de agua dulce presentan mucha riqueza en lo que se refiere a sales alcalinas, especialmente en carbonato y bicarbonato cálcico, están pobladas especialmente por Clorofíceas, Cigofíleas y Diatomeas, así como por Cianofíceas. En general estas aguas están contaminadas por materia orgánica y uno de los síntomas es la variación de la composición microalgal que resulta de ello. Esto puede resultar en una proliferación de tipos de algas particulares como por ejemplo la Euglenofícea.
- **Las Corrientes de agua** también contienen bentos y en lo que se refiere a las corrientes de agua fría se puede decir que estos se caracteriza por la proliferación de algas pardas de tipo Crisofícea colonial y en las aguas de curso más lento se pueden encontrar las Rodofíceas. En cuanto al fitoplancton, los cursos de agua suelen ser ricos en Diatomeas, clorofíceas unicelulares o coloniales.
- **Las aguas estancadas** presentan flora planctónica, en general es la única que existe y depende básicamente del pH del agua y de la concentración de calcio en la misma. Entre las algas más comunes en este tipo de agua se encuentran las diatomeas, Crisofíceas, Volvocales, Clorocales y Desmidiáles. La diversidad de las especies varía según la estación y la temperatura, como en el caso de las algas marinas, la proliferación mayor se da en primavera y luego del verano en el que se desmineralizan las aguas, otra proliferación aunque más pequeña, se da en otoño. Otros factores determinantes son, también en este caso la riqueza de fosfatos y nitratos en el agua.
- **En las Aguas Termófilas** se hace referencia a las aguas termales que pueden llegar a tener temperaturas muy altas; dado que las algas en términos generales no soportan más que unos 50°C, las especies que se encuentran en estos casos son mucho menos numerosas, en la mayoría de los casos están pobladas especialmente por algas Cianófitas que pueden soportar temperaturas de más de 80°C y algunas veces se pueden encontrar las Clorofíceas unicelulares y diatomeas.
- **En Aguas frías o congeladas** pueden vivir solo algunas especies de algas, aunque suelen ser abundantes donde se encuentren, siendo capaces de colorear amplias superficies en rojo, verde o pardo. Generalmente son Volvocales o Clorococales, aunque también puede encontrarse Diatomeas.

Algas aéreas

Aunque llamadas aéreas por que utilizan el aire como medio de transporte, en general estas algas pueden acomodarse a cualquier tipo de superficie que encuentren, el suelo es un lugar donde generalmente se las encuentra especialmente en los ambientes húmedos, aunque también son muy prolíferas en los suelos secos entre las partículas minerales. Se las encuentra con facilidad en suelos de jardín, suelos de bosque, lodo o arena de playa. También se las conoce como algas terrestres, siendo las más abundantes las algas verdes aunque también se encuentran las verde azuladas y pardo doradas. A veces se encuentran algas en suelos con poca actividad orgánica, áridos y/o arenosos, en esos casos ellas están realizando el trabajo de colonizarlo y de preparar el terreno para la vegetación superior.

Como son transportadas por el viento, pueden encontrarse en diferentes lugares como ser los árboles, edificios, rocas altas o cualquier otra superficie ubicada generalmente en zonas de clima húmedo. También suelen ser algas verde azuladas o verdes. Algunos suelos suelen estar tapizados literalmente por algas, especialmente en zonas muy húmedas, las más comunes son las siguientes: Signen, Hormidium, Clorococales Xantoficeas, Diatomeas, etc.



Ilustración 34.- Algas terrestres en Taiwán (Han, 2010)

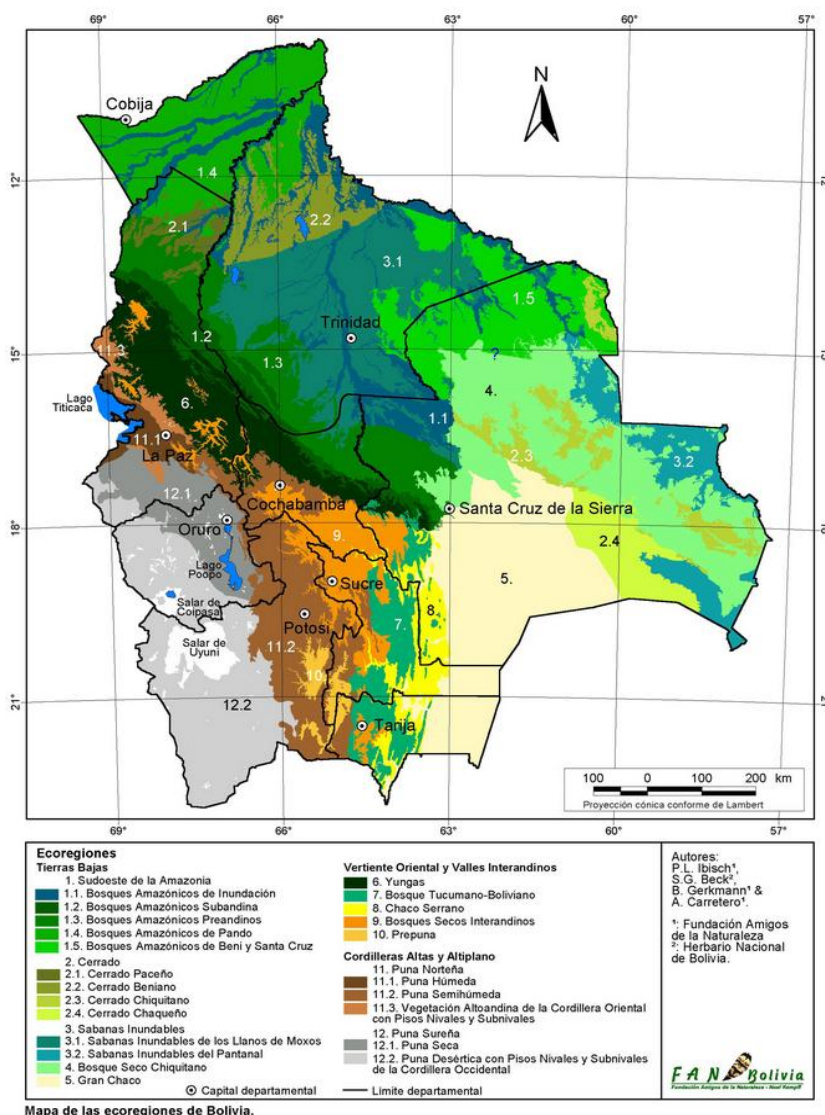
Algas endófitas

Por último las algas pueden vivir dentro o sobre otros organismos, como ser la superficie de las conchas de tortuga o animales como el perezoso de sudamérica, algunos insectos pueden llevar algas dentro o fuera como las aves acuáticas o incluso los peces, para quienes las algas representan, además una fuente muy importante de alimento; entre las que prefieren este hábitat podemos nombrar las

Zoocianelas, Zooclorelas, Zoodinoxantelas, etc. Otras veces se encuentran algas en combinación con hongos y forman los líquenes ya sean marinos o no.

Microalgas en Bolivia

Dado que el interés del presente trabajo se centra en implementar un sistema de producción de oxígeno biogénico en la Ciudad de La Paz, Bolivia, para mejorar la calidad del aire hacia el interior de las edificaciones en esa ciudad, es importante conocer algo sobre las investigaciones que existen en éste campo en Bolivia y específicamente en relación a las microalgas.



Mapa de las eco regiones de Bolivia.

Ilustración 35.- Mapa de las eco regiones de Bolivia. (Ibisch et al., 2012)

Bolivia pertenece al grupo de los 14 países con mayor diversidad del planeta (Grupo de Países Mega diversos con Espíritus Afines, formado el 2002 por iniciativa de México), aunque su extensión no es de las más grandes, con poco más de un millón de km² su ubicación tropical y especialmente su gradiente altitudinal, que va desde los 90 msnm hasta los 6,542 m que tiene el pico más alto de Bolivia correspondiente al Sajama, hacen de este uno de los países más diversos tanto en fauna como el flora donde se puede encontrar más de un 35% de la diversidad total del planeta lo cual se puede apreciar en la siguiente ilustración de las regiones ecológicas de Bolivia.

El paisaje boliviano, tan diverso como su topografía, incluye ecosistemas ubicados en altitudes y tipos de suelos muy diferentes entre ellos y muy complejos como son la zona de los Andes montañosos, las altiplanicies andinas, los bosques secos sub andinos, el bosque nublado de los Yungas y las tierras bajas de la Amazonía y el Chaco, cada una de las cuales se caracteriza por tener condiciones climáticas diferentes.

A pesar de esta riqueza natural, en Bolivia el interés por la biodiversidad es relativamente reciente, por lo que hay muy poca investigación realizada en el país y la mayor parte de la misma ha sido realizada por expertos extranjeros por lo que resulta de difícil acceso y aún así la mayoría de los trabajos están más relacionados con las plantas mayores, los vertebrados y los insectos mientras que hay muy pocos estudios sobre los crustáceos, las plantas menores y las algas. (Morales et al., 2008)

En su estudio realizado sobre la literatura existente en relación a las algas en Bolivia, Morales et al, (2008) concluyen que el fitoplancton de las zonas del altiplanos, la Amazonía y los Yungas son las que más se han estudiado pero los estudios se limitan a la taxonomía y aun son muy superficiales y solo cubre un pequeño número de grupos en las cuales las diatomeas son las más referenciadas.

Tampoco se han realizado estudios de biogeografías como las del Chaco, la formación Tucumana-Boliviana, el Pantanal y el Cerrado, todas de mucha importancia para el contexto boliviano y el suramericano. (Morales et al., 2008)

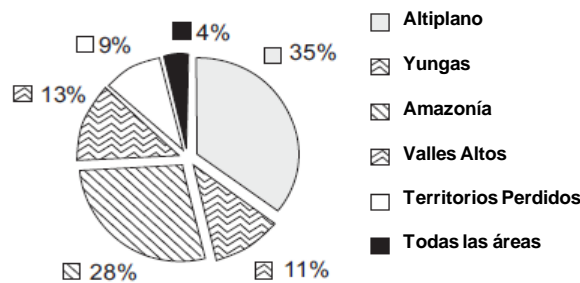


Ilustración 36.- Categorización (de los estudios realizados en Bolivia sobre algas) basada en el área geográfica cubierta, sólo para referencias taxonómicas (54 referencias). (Morales et al., 2008)

Por otra parte, las especies más estudiadas en los diversos sistemas ecológicos aún cuando fuera a un nivel exclusivamente taxonómico son en primer lugar las Diatomeas con un 22% de incidencia y las clorófitas con un 15%, mientras el resto se ha estudiado con una incidencia menor al 7%.

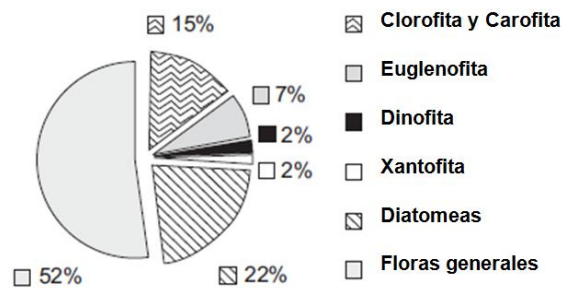


Ilustración 37.- Categorización basada en la división/Phylum algal, solo para referencias taxonómicas. (Morales et al., 2008)

Parece que la mayor riqueza de especies algales en Bolivia se encuentran en los numerosos lagos y pantanos de la altiplanicie, especialmente en la cuenca del Lago Titicaca, la diversidad de los lagos del sur de Bolivia como los de la cuenca del Pilcomayo, puede estar relacionada a la cantidad de sales en el agua, lo cual es típico de zonas áridas, (Maldonado et al., 2011), aunque dada la escasez de estudios en el resto del territorio boliviano es difícil tener una seguridad absoluta sobre este tema.

En todo caso, es necesario tomar en cuenta que aún queda mucho por investigar en todas las zonas del país no solo con respecto a las poblaciones de microorganismos en las aguas de altura pero especialmente en esta área de investigación en la cual se ha hecho muy poco.

Uno de los pocos estudios se han realizado a finales de la década de 1980 en el Lago Titicaca, en este estudio se analizan tomas realizadas a diferentes horas en 11 estaciones de la parte boliviana del Lago

Titicaca, en este estudio se ha determinado que la flora pelágica del Lago Titicaca parece poco variada, habiendo determinado 101 taxones de los cuales solo 38 son abundantes. Los géneros más variados son: *Navicula*, *Nitzschia*, *Fragilaria* y *Cyclotella*, mientras que los más abundantes son *Cyclotella* y *Fragilaria*. (Servant-Vildary, 1991)

En las siguientes ilustraciones se detallan las especies encontradas en cada una de las estaciones del Lago Titicaca, de las cuales se ha hecho un muestreo, así mismo se muestra la imagen del Lago Titicaca donde se han colocado aproximadamente la ubicación de cada una de las estaciones

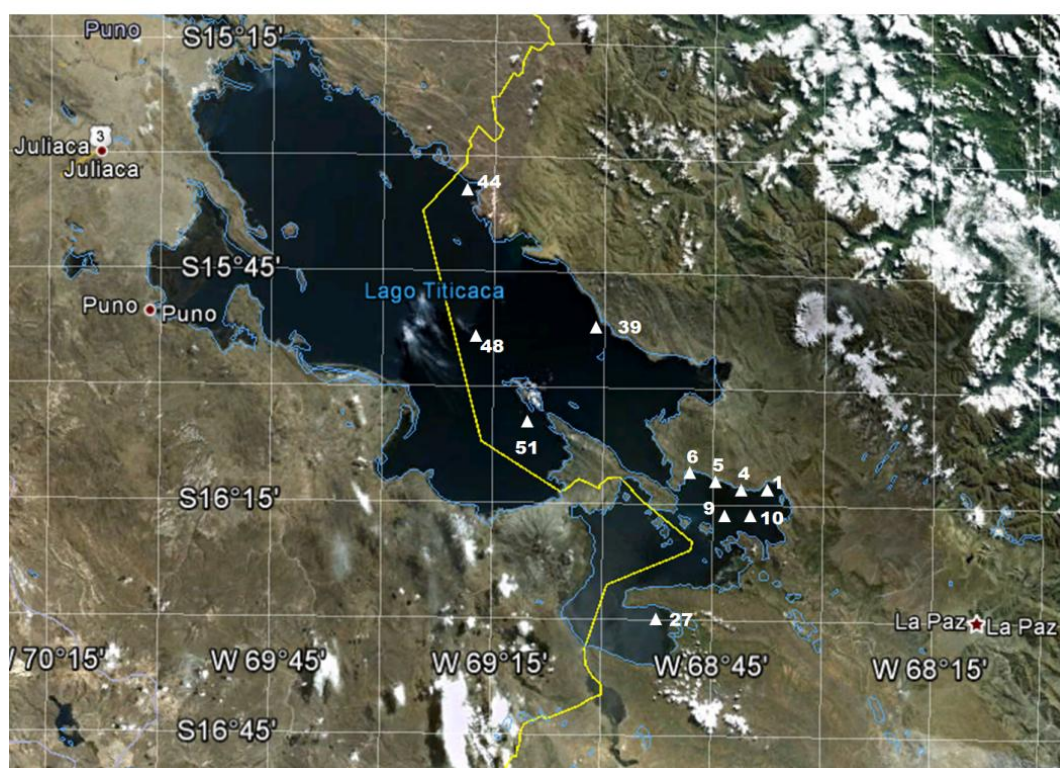


Ilustración 38.- Imagen de Google Earth donde se han colocado aproximadamente las estaciones del lago Titicaca de donde se han tomado las muestras del fitoplancton. Elaboración propia según el mapa encontrado en (Servant-Vildary, 1991)

Nº	Estaciones	Observaciones
1	44 y 48	Este grupo está dominado por los <i>Cyclotella esteligeroides</i> planctónicos. La estación 44, diferente por sus aguas turbias, está caracterizada por una mayor variedad específica, esencialmente ligada al desarrollo de los epifitas como ser los <i>Achnanthes delicatula</i> y <i>Amphora pediculus</i> .
2	27	Se distingue de todas las otras por la abundancia de <i>Cocconeis</i> , entre los cuales está <i>C. titicacaensis</i> , y además <i>Nitzschia admissoides</i> y <i>Fragilaria capucina</i> . Esta flora puede depender de la baja conductividad medida en esta estación o simplemente ser representativa de un medio poco profundo, colonizado por plantas acuáticas, medio ambiente preferencial de los <i>Cocconeis</i> .
3	1 y 39	La población se distingue por la presencia casi exclusiva de <i>Cyclotella andina</i> . Estas dos estaciones son muy diferentes por la profundidad (80 y 3.5 m) y la temperatura (12.6 y 8.9°C), y sólo tienen en común el hecho de haber sido muestreadas en junio de 1985. THERIOT et al. (1985) señalan también que las densidades de <i>C. andina</i> aumentan en dos estaciones también de diferente profundidad (147 m y 14 m), pero recolectadas entre los meses de mayo y agosto. Es en esta época del año que se sitúa, según los autores, una ruptura de la estratificación térmica, que se acompaña de un aumento de las sales nutritivas en el lago Mayor. La abundancia de esta especie en las estaciones estudiadas a esta época del año, podría explicarse por este factor.
4	5, 6 y 51	Este grupo sólo contiene escasas <i>C. andina</i> , pero se caracteriza por el desarrollo de <i>Fragilaria crotonensis</i> . Estas estaciones están ubicadas en zona profunda, respectivamente a 25, 40 Y 150 m. <i>F. crotonensis</i> que se presenta en largas cadenas (figs. 22 - 23) sería aquí netamente planctónica. Hay que señalar la presencia no explicada, conociendo sus preferencias ecológicas habituales (meso a euhalobia) de <i>Entomoneis paludosa</i> var. <i>salina</i> en la estación 5. Esta especie no ha sido muestreada en ninguna otra parte del lago Titicaca.
5	4 y 10	(Consideradas como una sola estación) Los grupos presentes en estas dos poblaciones son parecidos debido a la presencia de <i>Fragilaria ulna</i> , <i>Mastoglia smithii</i> y <i>M. atacamae</i> que no se encuentra, o sólo muy aislada, en otras estaciones. Asociadas a estos taxones, se encuentran especies que pueden, como las dos últimas, adaptarse a aguas relativamente cargadas en sales disueltas como ser <i>Nitzschia denticula</i> y <i>Nitzschia palea debilis</i> (SERVANTVILDARY y Roux, en impresión)
6	9	Este último grupo es parecido al anterior, pero se diferencia por la abundancia de <i>Navicula pseudolanceolata</i> . No se explica el desarrollo de esta especie sólo en la estación 9, puesto que las estaciones 4, 9 Y 10 se encuentran muy próximas las unas de las otras y localizadas en la parte norte del lago Menor

Ilustración 39.- Especies de fitoplacnton encontradas en 11 estaciones de monitoreo en el Lago Titicaca, zona Boliviana. (Servant-Vildary, 1991)

La falta de interés sobre las algas en Bolivia significa un obstáculo para el desarrollo de campos aplicados como la bioindicación, la biotecnología, y otros campos relacionados, que podrían representar soluciones viables a la actual condición económica boliviana. (Morales et al., 2008)

Es importante recordar que dado el cambio climático, el aumento de las temperaturas, el deshielo de los grandes macizos andinos y el crecimiento de la población, Bolivia se encuentra en una situación de alta vulnerabilidad por lo que es indispensable impulsar la investigación de su biodiversidad y protegerla pues es muy probable que en muy poco tiempo se vea profundamente afectada.

En cuanto a las microalgas que habitan en Bolivia, se entiende que dada la falta de investigaciones al respecto no se puede concluir sobre las especies más abundantes en la zona, ni las preferencias de cada especie en cuanto a temperatura, iluminación, nutrientes, etc. Es obvio que son necesarias investigaciones tanto a nivel general sobre la diversidad algal y el comportamiento de estas poblaciones relacionadas con la temperatura, la irradiación, y los demás elementos que influyen en el crecimiento de las microalgas, así como investigaciones especializadas relacionadas con el cultivo controlado en fotobiorreactores ya que con los datos que se tienen es imposible definir cuáles serían las especies idóneas para el cultivo en fotobiorreactores y que características deberían tener estos para crear un medio adecuado para el cultivo de microalgas en las zonas altas de Bolivia.

5.5.- Fotosíntesis

Uno de los procesos más interesantes de la naturaleza es aquél a través del cual algunos organismos son capaces de capturar la energía de la luz para transformarla en energía química que puede ser utilizada por organismos biológicos, este proceso se llama Fotosíntesis. La palabra fotosíntesis viene del griego ($\phi\omega\varsigma$, $\phi\omega\tau\acute{o}\varsigma$ *luz*, $\sigma\acute{\upsilon}\nu$ *juntamente* y $\theta\acute{\epsilon}\sigma\iota\varsigma$ *colocación*): que desde el punto de vista científico significa formación de un compuesto o una sustancia mediante la luz. (Morató, n.d.).

Tanto las plantas superiores como las algas, las microalgas y las bacterias son organismos capaces de realizar la fotosíntesis. La forma más conocida de este proceso es la de las plantas superiores y la de las algas, incluyendo las microalgas y las cianobacterias, quienes son las responsables de la mayor parte de la fotosíntesis en los océanos. (Vermaas, 1998).

Todos estos organismos convierten el bióxido de carbono (CO_2) en compuestos orgánicos a través de una serie de reacciones químicas, gracias a las cuales, elaboran tanto carhidratos como grasas y proteínas con la ayuda de las moléculas de hidrógeno y carbono contenidas en el agua, es decir a partir de compuestos inorgánicos, mientras liberan el oxígeno restante. Por todo esto se puede decir que la fotosíntesis representa la mayor fuente de energía química conocida. (Asimov, 1968)



Ilustración 40.- Proceso de la fotosíntesis (Asimov, 1968)

Es evidente que si no fuera por las plantas que renuevan la existencia de oxígeno en la atmósfera, el contenido del mismo se reduciría rápidamente y el aire contendría tanto anhídrido carbónico que asfixiaría la vida. Por otra parte, la vida animal tiene que agradecer a los organismos fotosintéticos la capacidad de crear tejidos, que representan el alimento básico de todos los animales, siendo los mismos, las microalgas para ser exactos, el primer eslabón de la cadena trófica.

El proceso de la fotosíntesis se inicia con la llegada de la luz a la superficie terrestre, ésta llega en forma de fotones que son capturados por los pigmentos contenidos en las células, principalmente clorofila y pigmentos carotenoides, y que son responsables del color de las plantas. Es importante indicar que el fenómeno de la fotosíntesis es mayoritariamente estimulado por el mismo rango de luz que es perceptible por el ser humano, vale decir que la longitud de onda de la luz visible también corresponde a la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR)²⁹ que tiene un rango aproximado de 380nm a 720nm. (Amos, 2004)

La clorofila absorbe la luz azul y la roja mientras que los carotenoides absorben la luz azul-verde, pero la luz efectivamente verde y la amarilla no es absorbida por la mayoría de las plantas, es por eso que éstas son verdes, sin embargo las algas azul verde o cianobacterias cuentan con pigmentos adicionales (Ficobilina) que les permite absorber colores que no son absorbidos por la clorofila o los carotinoides.

Existen también otros organismos fotosintéticos que son capaces de procesar ondas que se encuentran fuera del espectro visible por el ser humano por encima de los 700 nm e incluso 1000 nm, son bacterias fotosintéticas pero que no producen oxígeno ya que logran la fotosíntesis en condiciones anaeróbicas. En el caso de las longitudes de onda corta menores a 300 nm, casi todos los organismos se ven afectados negativamente por las mismas, pero como sabe, estas ondas en su mayoría son filtradas por la atmósfera antes de tocar la superficie terrestre. (Vermaas, 1998)

²⁹ PAR por sus siglas en inglés Photosynthetically Active Radiation

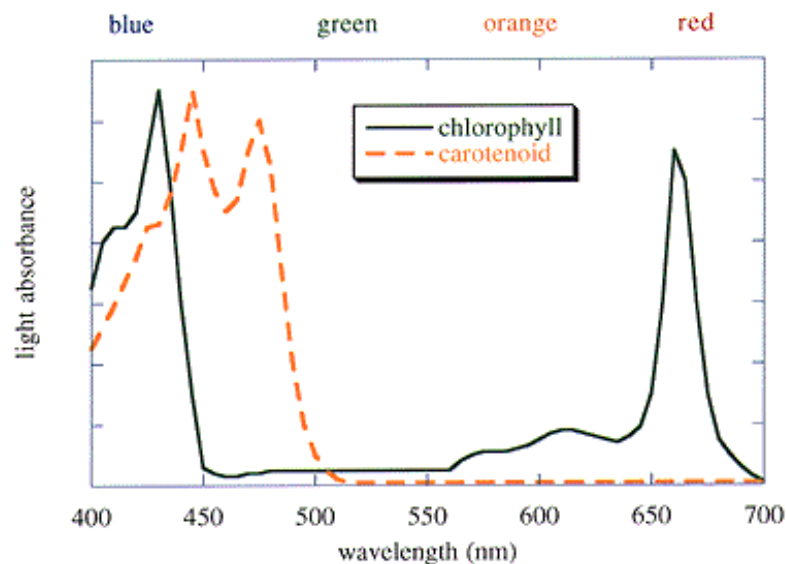


Ilustración 41- Espectro de absorción en las especies clorofílicas y carotinoides (Vermaas, 1998)

Además del hecho que las plantas no absorben todo el espectro de luz que reciben, es necesario tomar en cuenta que la energía es inversamente proporcional con la longitud de onda, un fotón de luz azul (400 nm) tiene más energía que uno de luz roja, (700 nm). Esta diferencia energética dentro del espectro de luz evita que toda la energía solar absorbida sea aprovechada; de tal manera que se calcula que de toda la radiación que se recibe en un día soleado, solo el 40% sea activa fotosintéticamente. Tanto los pigmentos de clorofila (color verde o azul verde 400 - 475 y 600 a 700 nm) como los carotenoides (color naranja o rojo 400 - 500 nm) son lipófilicos y las ficobilinas son hidrofílicas. (Amos, 2004)

Existen muchos tipos de pigmentos fotosintéticos, estos difieren entre ellos por su estructura química variable ya que generalmente están asociados a proteínas, si bien la luz es captada por el pigmento individualmente, ésta no es utilizada inmediatamente por estos pigmentos para la reacción energética, lo que sucede es que la energía lumínica es transferida a clorofilas que están en un medio proteínico donde tiene lugar la conversión energética; es decir que la energía lumínica se utiliza para transferir un electrón a un pigmento vecino, los pigmentos y las proteínas relacionadas con esta primera transferencia de electrones, se conocen como centro de reacción y un gran número de moléculas de pigmento, entre 100 y 5000, conocidas como "antena", capturan la luz y transfieren la energía lumínica al mismo centro de reacción, en una serie de reacciones en cadena llamadas reacciones de reducción-oxidación gracias a las cuales se produce la transferencia del electrón hasta que la energía es atrapada en éste.

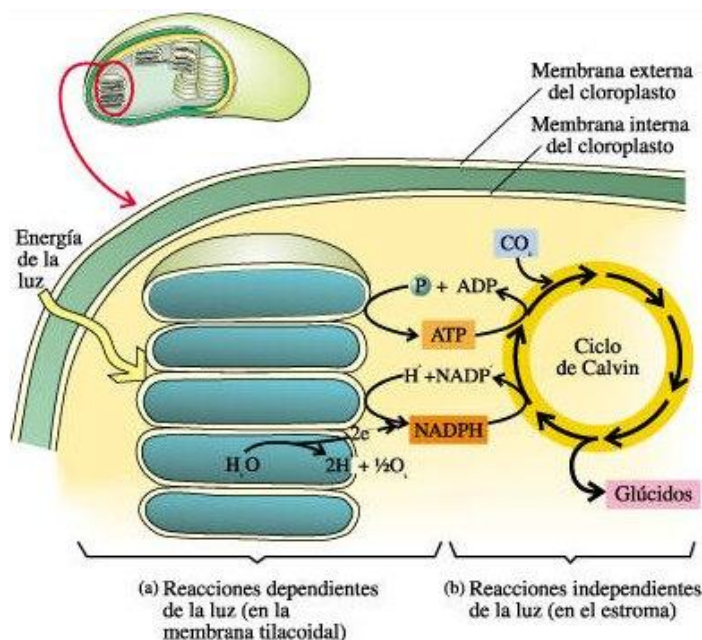


Ilustración 42.- Esquema Global de la Fotosíntesis (Netto, n.d.)

Todos los organismos que producen oxígeno durante la fotosíntesis cuentan con dos tipos de centros de reacción: el fotosistema II (FSII) y el fotosistema (FSI), ambos complejos de pigmentos y proteínas ubicados en la membrana tilacoide. En las eucariotas, grupo al que pertenecen tanto las plantas superiores como las algas, la membrana tilacoide se encuentra en los cloroplastos, en el caso de la mayoría de las cianobacterias se encuentran en la membrana tilacoide que forman estructuras mucho más complejas en el interior de la célula, al carecer de cloroplastos.



Ilustración 43.- "Ruptura" del agua, proceso que se da dentro del Fotosistema II (1)

En los organismos oxigénicos, la clorofila siempre está ubicada en la membrana tilacoide y está asociada con los FSI y FSII o con una cadena proteínica llamada antena que se encarga, a su vez, de alimentar estos sistemas con energía, es en el FS II en el que se realiza la reducción del agua en y en este proceso se libera O₂ (ver Ilustración 43). A partir de esta reacción en el FS II, se producen una serie de intercambios de electrones que son expulsados ya sea desde los aminoácidos que son parte de la proteína que rodea al sistema, o desde la reacción producida por la reducción del agua que van a reemplazar el electrón cedido por el aminoácido. En el caso de este centro de reacción, los electrones

fluyen hacia moléculas portadoras libres llamadas plastoquinonas ubicadas en la membrana tilacoide y de ahí son transportadas a otro complejo proteínico llamado complejo citocromo *b6f*.

El centro de reacción llamado FSI también realiza la separación de cargas de la misma forma que el anterior, sin embargo en este caso la luz es recibida por la antena y es transferida a un centro de reacción de clorofila donde la separación inducida por la luz se inicia, en este caso, en el FSI, los electrones son transferidos a la Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato (NADP), para la producción de NADPH_2 que se utiliza para la fijación del carbono. Así, la transferencia de electrones a través de los FSII y FSI resulta en la oxidación del agua, es decir la eliminación del O_2 contenido en el agua y en la reducción de la NADP gracias a la energía provista por la luz (2 quanta por cada electrón transportado a lo largo de toda la cadena). (Vermaas, 1998)

Como se ha visto, este proceso se inicia con la captura de luz por lo que es necesario contar con un cierto nivel de luz para que se active, sin embargo, cuando ésta es demasiado intensa es probable que los electrones no tengan la capacidad de ser transferidos a mayor velocidad, así que a intensidades de luz muy altas, parte del sistema colapsa, fenómeno al que se llama fotoinhibición. En este caso la producción de biomasa y de O_2 es mucho menor que en condiciones adecuadas de luz.

Continuando con el proceso de la fotosíntesis, el flujo de electrones desde el agua al NADP requiere de mucha luz y está emparejado a un gradiente de protones a lo largo de la membrana tilacoide, este gradiente de protones se utiliza en la síntesis del Adenosin trifosfato (ATP), una molécula de alta energía pero aún inestable y que será de utilidad para la fijación del CO_2 en un proceso que se ha venido a llamar la fase oscura de la fotosíntesis pues es la parte de ésta que se realiza de forma independiente de la luz. Las reacciones que son necesarias para la fijación del CO_2 se llaman ciclo de Calvin-Benson. La reacción para fijación del CO_2 está relacionada una enzima llamada RuBisCo³⁰ la misma que puede reaccionar ya sea con O_2 o con CO_2 , aunque preferentemente, en un medio en el que se encuentren ambos componentes, reaccionará con el CO_2 y solo reacciona con el O_2 en caso de niveles muy bajos de CO_2 .

Cuando la RuBisCo reacciona con el O_2 , se llama fotorespiración y no se logra la fijación del carbono, este fenómeno es común dado que la cantidad de CO_2 es mucho menor que la cantidad de O_2 . Cuando la RuBisCo reacciona con el CO_2 se inicia el ciclo de Calvin-Benson, del cual solo diremos que consiste en una serie de reacciones bioquímicas que tienen como objetivo final la de convertir moléculas inorgánicas a partir del CO_2 en moléculas orgánicas sencillas (glucosas), el NADPH_2 que tienen un alto poder reductor y el ATP, a partir de las cuales se formarán todos los compuestos bioquímicos que forman a los seres vivos.

³⁰ RuBisCo ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa, proteína-enzima que es necesaria tanto para la fijación del CO_2 como para la foto respiración o respiración de los organismos fotosintéticos.

Por otra parte, las microalgas, al igual que las plantas, no solo tienen una función fotosintética, una vez que dejan de estar estimuladas por la luz solar, ellas pasan a consumir oxígeno para liberar bióxido de carbono; este proceso que es similar al de todos los demás seres vivos incluidos los animales, se llama respiración y se puede resumir en la siguiente ecuación:



Ilustración 44.- Proceso de Respiración (Asimov, 1968) (2)

Las dos ecuaciones (1 y 2) unidas forman lo que se conoce como el Ciclo del Carbono, porque este elemento representa en él un papel clave, aunque también lo hace el oxígeno y los otros elementos. Se puede decir que el Ciclo del Carbono representa el gran ciclo que hace que la vida funcione a la perfección: el alimento, el agua, el oxígeno y el bióxido de carbono se consumen y se forman una y otra vez para crear y alimentar la vida, ciclo que, en teoría, podría durar eternamente. (Asimov, 1968)

Lo que impulsa este ciclo es la luz solar y como se ha visto, ésta se transforma en energía química que es, en definitiva la que hace posible todas las manifestaciones de la vida.

En cuanto a la diversidad de organismos fotosintéticos es importante aclarar que aunque generalmente se asocia a la fotosíntesis con las plantas superiores, los organismos fotosintéticos son innumerables, además de las plantas superiores, las algas y las microalgas, hay bacterias que son capaces de realizar la fotosíntesis aunque no siempre utilizan el agua, existen algunas que sintetizan sulfuros pero son igualmente capaces de fijar el CO_2 . Los organismos que realizan este proceso son bacterias que han sido descubiertas recién en la década de los 80's. Investigaciones posteriores sobre diversos organismos fotosintéticos muestran como todos los centros de reacción de una gran variedad de microorganismos fotosintéticos están estrechamente relacionados entre ellos.

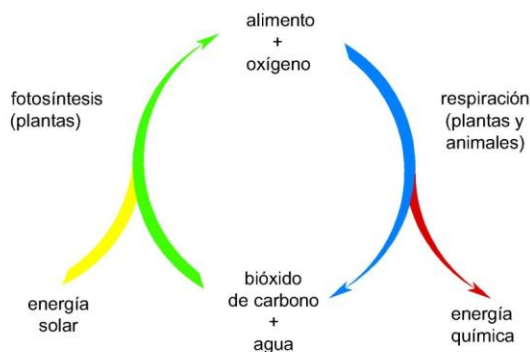


Ilustración 45.- El ciclo del Carbono (Asimov, 1968)

En lo que se refiere a la producción de oxígeno, el bioquímico ruso-estadounidense Eugene I. Rabinovich, citado por (Asimov, 1973), estima que cada año las plantas verdes de la tierra combinan un total de 150 mil millones de toneladas de carbono (a partir del anhídrido carbónico) con 25 mil millones de toneladas de hidrógeno (a partir del agua), y liberan 400 mil millones de toneladas de oxígeno. En esta gigantesca producción, las plantas de los bosques y campos de la tierra firme sólo contribuyen en un 10%; el restante 90% debemos agradecerlo a los organismos unicelulares y algas marinas de los océanos.

Por último, es necesario hacer referencia a la Cadena Trófica que mantiene en equilibrio a todos los ecosistemas del planeta. Como se ha visto, a través de la fotosíntesis se inicia la vida y con ésta la evolución de los seres vivos.

El proceso de transferencia de energía alimenticia conocida como cadena trófica, consiste en el que cada ser vivo se alimenta del precedente y es alimento del siguiente. Es la corriente de energía y nutrientes que se establece entre las distintas especies de un ecosistema en relación con su nutrición.

Esta cadena se inicia con seres microscópicos que forman el plancton de los océanos y con los seres que realizan el proceso de la fotosíntesis, conocidas como especies productoras; las especies productoras son consumidas por especies consumidoras que pueden ser herbívoras, carnívoras que se alimentan de herbívoras o carnívoras que se alimentan de carnívoros; por último, están las especies descomponedoras que se alimentan de carroña o microorganismos que descomponen el resto de los cadáveres y que convierten la materia orgánica en materia inorgánica, cerrando el ciclo de la vida.

Solo una parte de la energía almacenada en un nivel trófico pasa al siguiente nivel, debido a que los organismos usan gran parte de la energía que consumen para llevar a cabo sus procesos vitales, como respiración, movimiento, crecimiento y reproducción. El resto de la energía se libera al medio ambiente en forma de calor: Solo un 10% de la energía disponible dentro de un nivel trófico se transfiere a los organismos del siguiente nivel trófico. (Miller & Levine, 2004)

5.6.- Usos de las algas

El uso de las algas por parte de los seres humanos se remonta a más de dos mil años, se sabe, por ejemplo, que en Asia estas eran comúnmente utilizadas como fuente de alimento en épocas de hambre y que poco a poco los asiáticos fueron añadiéndolas a su dieta diaria de diferentes maneras según los usos y las costumbres de cada cultura de la zona.

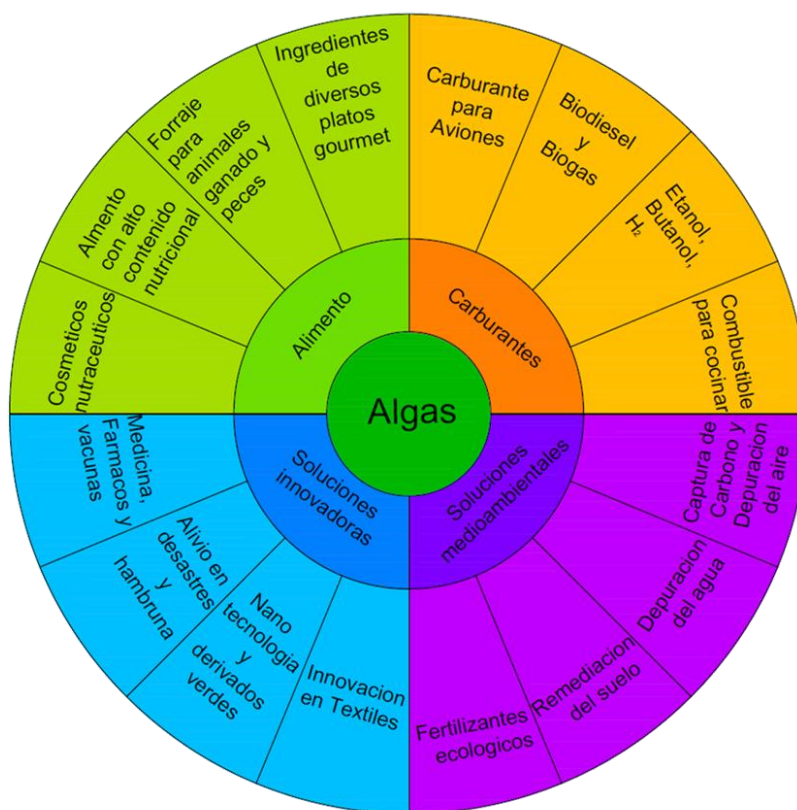


Ilustración 46.- Esquema de los diferentes productos que nos ofrecen los cultivos de las algas así como las soluciones que su cultivo ofrece al medio ambiente. (Henrikson & Edwards, 2011)

Actualmente las investigaciones relacionadas con las micro algas abarcan un abanico muy amplio ya que se investigan desde ramas muy diversas como la ciencia, la producción energética, el comercio, la farmacéutica y la medicina. Muchas de las investigaciones se concentran en el desarrollo de energéticos y biocarburantes dada la crisis energética en la que se encuentra el planeta pero no son menos importantes las investigaciones que se están realizando en los otros campos.

- **Como Alimento**

Como se ha visto, las micro algas en el proceso fotosintético son capaces de crear moléculas orgánicas a partir de moléculas inorgánicas, es decir tejidos que son en definitiva alimentos, este hecho hace que la biomasa producida por microalgas sea una fuente inagotable de nutrientes tanto para el ser humano como para los animales.

Si bien se sabe que las microalgas se usan desde la antigüedad como alimento, después de la segunda guerra mundial, se les usó para dar solución a la necesidad de alimentos de la creciente población y se inician experimentos con diversas algas, concentrándose en las que tienen mayor capacidad para la creación de proteínas, como son la *Spirulina* (*Arthrospira*), el *Nostoc*, o las especies *Aphanizomenon*, las mismas que fueron cultivadas a gran escala hasta mediados de los años 80's.

A partir de la década de los 80's, en Asia se multiplica el cultivo de otras especies también muy adecuadas para la alimentación, especialmente de la *Chlorella* y *Dunaliella salina* como fuentes de beta caróteno. Posteriormente, países como Estados Unidos, Israel e India se unen a estos en el cultivo de algas para todo tipo de aplicaciones.

Las microalgas que se utilizan para la nutrición del ser humano se comercializan actualmente en forma de cápsulas, tabletas, jarabes o disimuladas dentro de los mismos alimentos que consumimos como son bebidas, pastas, barras energéticas, etc. Dentro de toda la gama de algas que pueden utilizarse con fines nutricionales, las más comunes son: *Arthrospira*, *Chlorella*, *D. salina* and *Aphanizomenon flos-aquae*. (Spolaore et al., 2006)

La *Arthrospira* es utilizada para la alimentación humana por su excelente valor nutricional, su gran contenido de proteínas y su gran capacidad para mejorar la salud, como ser el alivio de la hiperlipidemia, es decir, un exceso de lípidos en la sangre, la supresión de la hipertensión, protección contra la insuficiencia renal y otros. (Spolaore et al., 2006)

La *Chlorella* es generalmente utilizada por su capacidad de reducir los lípidos en la sangre, y por su alto contenido en β -1, 3-glucan el cual es un potente inmuno estimulante. Por otra parte también cuenta con otras propiedades que ayudan positivamente a la salud del ser humano, como ser su eficiencia en el tratamiento de las úlceras gástricas, estreñimiento, y su eficacia como prevención de la arterioesclerosis y la acción antitumoral.

D. Salina es explotada principalmente por su contenido de β caroteno el mismo que llega a representar el 14% de toda la biomasa seca y se utiliza generalmente como un suplemento dietético. (Spolaore et al., 2006)

El cultivo de microalgas genera un movimiento económico bastante importante que ha ido creciendo durante los últimos años, como ejemplo solo durante el 2006 el mercado de la biomasa algal produjo alrededor de 5000 toneladas de materia seca por año y genera un retorno de aproximadamente 1.25×10^9 \$Us.- (1.25 mil millones de dólares) (Spolaore et al., 2006)

- **Como fuente bioenergética**

En las últimas décadas, se ha visto la posibilidad de que las microalgas, especialmente las especies oleaginosas, podrían ser una alternativa mucho más viable que cualquier otra fuente para la producción de biocombustibles, ya que al ser organismos fotosintéticos, solo requieren luz solar, agua y CO₂ y eventualmente algunas sales que servirían para la producción de biomasa y lípidos.

Además estas especies son los organismos más eficientes en el proceso del CO₂ y la producción de O₂, comparado con cualquier planta, crecen extremadamente rápido, algunas especies llegan a reproducirse tanto que duplican su biomasa en 24 horas. En general y durante la fase exponencial esta biomasa puede ser duplicada en apenas 3,5 horas (Chisti, 2007).

No menos impactante es el hecho de que por cada 100 toneladas de microalgas producidas, se deben consumir 183 de bióxido de carbono, lo que las convierte en uno de los seres vivos más eficientes en la captura de CO₂. Por otra parte la productividad de aceite es mucho mayor que cualquier otro cultivo convencional, se calcula que el rendimiento es de 10 a 20 veces mayor que el derivado de la leche de palma y de 200 a 400 veces mayor que el derivado de la leche de soya. (Loera-Quezada & Olguín, 2010)

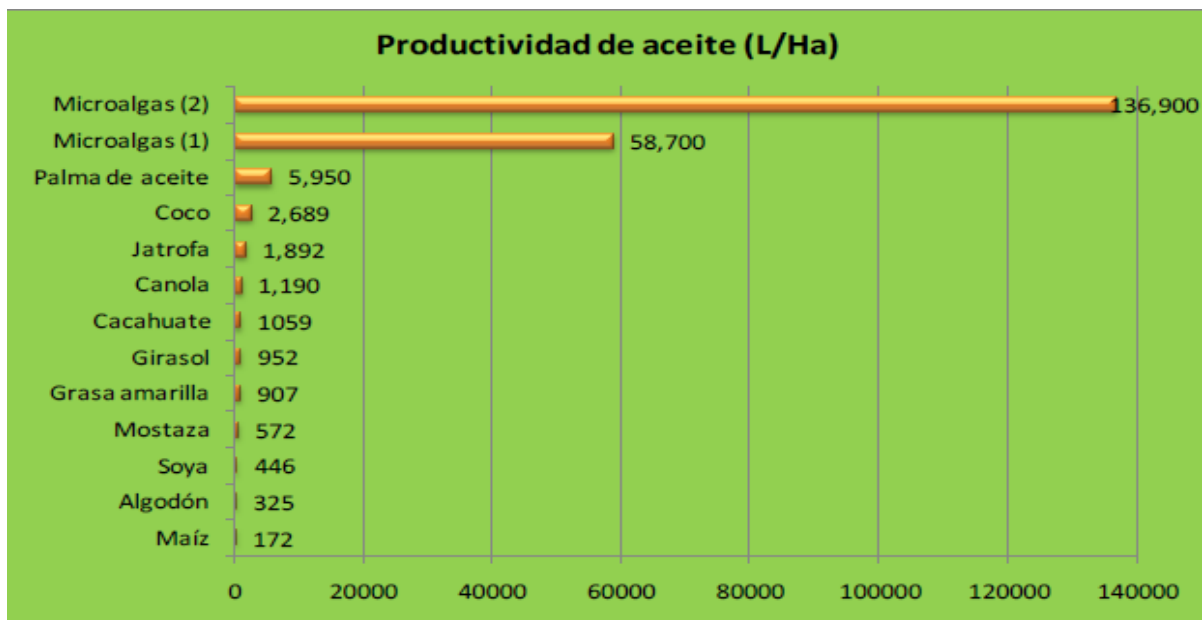


Ilustración 47.- Productividad de aceites de microalgas en comparación con los cultivos convencionales, donde Microalgas (1) 30% de aceite en biomasa (con base a peso seco) y Microalgas (2) 70% de aceite en biomasa (con base a peso seco) (Loera-Quezada & Olguín, 2010).

Una de las ventajas mayores es que el cultivo de microalgas oleaginosas para la producción de biocombustibles no entra en competencia con el cultivo de alimentos, por lo que no influye en el precio final de los mismos.

Otra ventaja que presentan es la menor cantidad de espacio real que requieren para su cultivo tanto en estanques abiertos como en fotobiorreactores cerrados. Por ejemplo para lograr 1 quadrillón de BTU de algas se requieren 200 mil hectáreas, mientras que para lograr la misma cantidad con derivados del maíz, se necesitarían aproximadamente 40 millones de hectáreas o 20 millones de hectáreas si se tratara de soya.

La mayor producción de biomasa derivada de la palma o de la caña de azúcar difícilmente puede competir con la biomasa derivada de las micro algas, esto y el hecho de que ellas no interfieren con el mercado alimenticio hace que las micro algas sean potencialmente la mejor opción sustentables para la elaboración de biodiesel o bioetanol con el objetivo de desplazar a los carburantes derivados del petróleo, que poco a poco deben ser reducidos por su contribución al calentamiento global y por su escasez cada vez más alarmante.

Aunque todavía no se ha logrado desplazar al petróleo, y mucho autores dudan que alguna vez se logre, actualmente el cultivo de microalgas se ha extendido bastante especialmente en diferentes lugares de Estados Unidos y Europa e incluso en América latina, países como Chile han iniciado proyectos de cultivo de microalgas para diferentes objetivos, entre los cuales el más ambicioso sigue siendo el reemplazo de los carburantes fósiles

- **Aplicaciones medioambientales**

Uno de los problemas más graves que enfrenta actualmente la humanidad es la gran contaminación del medio ambiente por acción del propio ser humano, tanto la atmósfera como el agua, están sobrecargadas con desechos de toda índole que el ser humano va generando a través de sus diversas actividades domésticas, agrícolas o industriales, por lo que las zonas más afectadas son las más cercanas a las grandes urbes, sin embargo, es necesario tener en cuenta que el planeta es un sistema cerrado y por muy complejo que éste sea, cualquier daño que se le haga en un lugar determinado, llegará a afectar tarde o temprano a la totalidad del mismo.

El cultivo de microalgas puede coadyuvar a resolver parte de la contaminación ambiental tanto si se refiere al agua, a la atmósfera.

- **Tratamiento de aguas residuales**

En lo que se refiere a las fuentes de agua, estas reciben todo el desecho sólido y líquido, siendo las fuentes cercanas a las grandes urbes las que se ven más afectadas de forma inmediata. Actualmente hay muchas investigaciones concentradas en paliar estos efectos negativos de la actividad humana y la sobre población y uno de ellos es el uso de las microalgas para mejorar la calidad del agua residual antes de descargarla a los efluentes naturales.

El cultivo de microalgas como alternativa para el tratamiento de aguas residuales se presenta como muy adecuado debido a la capacidad de éstas de eliminar los nutrientes orgánicos, inorgánicos e incluso los metales pesados al incorporarlos a la biomasa. Se pueden realizar tratamientos primarios, secundarios o terciarios dependiendo del objetivo, del tipo de agua a tratar, del tipo de cultivo y del sistema a utilizar e incluso respecto a la obtención de un producto final específico.

Esta acción de las microalgas provoca una mejoría notable en la calidad de efluente a través de la remoción de sales, un aumento en el pH del agua, la mayor oxigenación de la misma, una mejora de la acción bactericida, etc. (Salazar, 2006)

Países como la India, Israel, Estados Unidos y Brasil entre otros han adoptado este sistema para el tratamiento de aguas residuales de diferentes fuentes donde se utilizan más comúnmente las siguientes especies: *Scenedesmus*, *Euglena*, *Chlorella*, *Ankistrodesmus*. Cabe mencionar que la microalgas producidas en el tratamiento de aguas residuales es también utilizada para varios objetivos entre los que se pueden nombrar la acuicultura (*Chlorella*, *Chaetoceros* y otras); para la alimentación animal, como fertilizantes y como productos químicos y energéticos.

- **Captura de CO₂**

La atmósfera recibe todos los gases de desecho producto de las industrias, de los incendios, de la actividad volcánica y de la respiración animal y vegetal. Hasta aproximadamente un siglo esto no representaba un problema ya que el sistema terrestre era perfectamente capaz de mantener su equilibrio a través de los ciclos naturales de los elementos. A medida que la población mundial fue creciendo ese equilibrio se ha visto cada vez más vulnerado y actualmente la atmósfera se encuentra excesivamente

cargada de gases³¹ que además de incrementar el efecto invernadero, presentan un riesgo para la salud especialmente en zonas altamente pobladas o industriales.

Como se ha visto en capítulos anteriores, las algas utilizan el CO₂ como nutriente, específicamente como fuente de carbono (C) transformarlo en biomasa con el apoyo de la luz solar, la capacidad de éstas de fijar el CO₂ es de 10 a 50 veces mayor que de las plantas terrestres, (Loera-Quezada & Olguín, 2010) así que la posibilidad de utilizarlo para alimentar a un cultivo de microalgas está demostrado y aunque es perfectamente factible, es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones, entre las cuales la más importante es la fuente de dicho gas.

Sin embargo, se puede utilizar el cultivo de microalgas para tratar las emisiones de una caldera o chimenea industrial, de esta manera, se podría aprovechar todo el gas producido por esta tanto durante el día, como durante la noche, cuando los gases de desecho se podrían almacenar ya que las microalgas no los procesarían en ausencia de luz.

Además de la captura de CO₂, las algas son capaces de utilizar al menos en parte los otros gases de combustión por lo que esta combinación puede ser altamente beneficiosa para el medio ambiente.

- **Otras aplicaciones**

En lo que se refiere a la cría de peces, el uso de algas no solo mejora considerablemente las calidades nutricionales de los peces alimentados con ellas, sino que además producen una mejora cuantitativa de las condiciones del agua y los estques donde se realiza esta cría, en general las algas aportan más oxígeno, más nutrientes y mantienen el medio en un equilibrio más adecuado para la vida acuática y por lo tanto la cría de diferentes especies.

En el caso de los peces, es útil tanto para la nutrición de las larvas o para consumo directo de los moluscos y langostinos o camarones, las especies utilizadas más comunes son: *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Skeletonema* y *Thalassiosira*.

Por otra parte es ampliamente conocido que tanto el ganado como los animales de granja son alimentados con suplementos de algas, esta práctica, apoyada por una serie de evaluaciones toxicológicas y nutricionales es utilizada a gran escala en muchos países y parte de los alimentos que se comercializan para el alimento de mascotas tiene como base estos suplementos, gracias a que las algas

³¹ Los gases más comunes son el monóxido de carbono (CO), el Dióxido de carbono (CO₂), los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), los Óxidos de Azufre (SO_x) y el Ozono (O₃)

afectan positivamente la fisiología de todos estos animales ya que, mejora su respuesta inmunológica , la fertilidad y la apariencia externa.

En lo que se refiere a aves de corral, éstas pueden ser alimentadas con suplementos de algas en un rango que va del 5% al 10%, ya que cantidades superiores a estas pueden causar cambios en el aspecto de los productos de estos animales, por ejemplo, cambios de color en la yema del huevo han sido identificados como efectos secundarios de la alimentación a este tipo de animales con una mayor proporción de alga de la citada.

Otras aplicaciones al cultivo de algas pueden ser las cosméticas, precisamente por su gran valor nutritivo, las algas se utilizan ampliamente en cosmética y en el cuidado de la piel, ya sea para productos relacionados con la eliminación o atenuación de los signos de la edad, así como productos para la protección solar.

Finalmente el cultivo de microalgas es posible tanto en agua dulce como en agua salada, y como se ha visto anteriormente, se adaptan a prácticamente cualquier condición por lo que es posible cultivarlas en casi cualquier parte del planeta, teniendo una ventaja clave que es la capacidad de limpiar las aguas donde se cultivan ya que son capaces de utilizar los desechos como nutrientes.

El gran problema que se enfrenta en la actualidad es la parte económica, si bien los cultivos se pueden realizar tanto en estanques abiertos como en fotobiorreactores el precio sigue siendo aún muy alto para ambos. Los fotobiorreactores han probado ser mucho más eficientes³² por lo que se intenta lograr que el precio del cultivo pueda ser competitivo en el mercado a pesar de la gran infraestructura que se requiere. (Chisti, 2008)

³² Aunque aún puede haber debate muchos autores asumen que los FBR son mucho más eficientes que los estanques abiertos dado que en los mismos se pueden controlar mejor de posibles contaminaciones y son más productivos que los estanques (Chisti, 2008).

Capítulo 6

6.- Producción de Oxígeno Biogénico

En el anterior capítulo se ha realizado un acercamiento al conocimiento de las algas y en especial de las microalgas, más allá de las características biológicas, se han visto sus hábitats y los diversos usos para los cuales están siendo cultivadas en la actualidad. No es difícil comprender que si se cultivan a gran escala y controladamente, las microalgas pueden ser la respuesta a diversos problemas que enfrenta la humanidad actualmente, como son los problemas de alimentación de la cada vez mayor población y una alternativa energética renovable y menos contaminante.

Teniendo en cuenta que las zonas de altura son áreas de alta escases de recursos alimenticios y energéticos, se propone el cultivo de las microalgas para poder aprovechar todo lo que ellas producen desde el oxígeno, que liberan como subproducto, hasta la biomasa que producen por su capacidad fotosintética.

A continuación se hace una reseña histórica del descubrimiento de los gases que conforman el aire y de la participación de las microalgas en la creación de nuestra atmósfera, se analizarán las formas de cultivo; las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas, y detalles más específicos que pueden ayudar a la implementación y diseño de un sistema de cultivo de microalgas.

6.1 Antecedentes Históricos

El oxígeno debe su nombre al físico francés Lavoisier, quien asumiendo que todos los ácidos debían contener necesariamente este elemento, formó el nombre con dos palabras griegas: ὀξύς ácido y γένος origen. El nombre persistió en todo el mundo a pesar de que realmente no todos los ácidos contienen oxígeno y se desdeñaron otros nombres dados por otros científicos que lo habían descubierto con anterioridad pero no lograron describir todas sus propiedades.

Como la atmósfera es invisible, es incolora e insípida, los científicos tardaron mucho tiempo en darse cuenta que en el aire había algo que permitía la vida, y más aún que eran diferentes gases los que componían la atmósfera. El primero en estudiar los gases fue Stephen Hales, botánico Inglés que estudiando las plantas y viendo en estas la capacidad de eliminar vapor de agua, se dio cuenta que se alimentaban también del aire, ya que sus deducciones dejaban claro que debía haber algo más, además del suelo y el agua, que hiciera que las plantas crecieran.

Fue el primero en aislar los gases como el hidrógeno, bióxido de azufre, metano, monóxido de carbono y bióxido de carbono. Sin embargo Hales, no se dio cuenta que estaba operando con sustancias distintas, él pensó que estaba trabajando con formas modificadas del aire, no con diferentes componentes del mismo. (Asimov, 1968)

Sin embargo la manera de aislar los gases y los resultados que con esto obtuvo fueron un muy buen estímulo para que científicos del siglo XVIII continuaran sus investigaciones. Así, en 1756, el químico Joseph Black se interesó en el bióxido de carbono al observar que cuando se combinaba con la cal formaba la piedra caliza. Lo más interesante del experimento de Black fue que para que esto sucediera no necesitaba añadir CO_2 a la cal, pues solo con dejarla al aire, el fenómeno aparecía, por lo que dedujo que el aire debía contener al menos un poco de CO_2 .

Posteriormente, el químico Rutherford logró aislar del aire al CO_2 , pensando que este era el responsable de que una vela no ardiera dentro de un recipiente cerrado, sin embargo, al realizar el experimento pudo darse cuenta que además del CO_2 , el aire contenía una mucho mayor cantidad de otro gas que tampoco permitía que la vela ardiera aunque claramente no era bióxido de carbono, pero nunca pudo averiguar de qué gas se trataba ni interpretar su hallazgo. Un par de años más tarde, fue el ministro Inglés Joseph Priestley que, al estudiar los mismos gases, en lugar de pasarlos por agua para aislarlos los pasó por mercurio, y logró así hallazgos aún más impresionantes ya que se aislaron gases que al ser solubles en agua no habían podido ser aislados anteriormente.

Uno de estos gases fue el oxígeno. Priestley observó que el mercurio formaba un polvo rojizo en contacto con el aire que al ser calentado a grandes temperaturas, se aislaba y el polvo volvía a ser mercurio mientras el otro componente se quedaba en el aire. Al introducir en este aire especial una astilla, ésta se incendió, lo cual demostraba que era un componente del aire pero no era aire simplemente, al introducir roedores en la campana de este aire ellos se comportaban particularmente retozones e incluso el científico sentía efectos similares en sí mismo cuando respiraba este gas. Pero tampoco supo lo que había descubierto,

El que finalmente tuvo el privilegio de encajar todas las piezas fue el químico francés llamado Antoine Lavoisier, quien en 1775 observó que el aire estaba formado principalmente por 2 componentes: el gas de Priestley, al que nombró oxígeno, por las razones que ya se han explicado y el gas de Rutherford, al que lo llamó azoe que en griego significa "sin vida", por que observó que los ratones en una campana llena de este gas morían casi de inmediato. Esto lo llevó a concluir que el oxígeno no solo era importante para la combustión, sino también para los procesos vitales del cuerpo, de tal manera que se imaginó que los procesos vitales debían llevar a cabo también algún tipo de combustión, una combustión que suministrara la energía suficiente para la vida; es esta combustión lo que actualmente conocemos como respiración. Posteriormente el gas llamado azoe pasó a llamarse nitrógeno por que se encontraba en grandes cantidades en un mineral común llamado nitro.

Lavoisier dedujo que la combustión debía tener un elemento aparte que se quemara en contacto con el oxígeno y se dio cuenta que el gas descubierto por Black era, de hecho una combinación de 2 elementos que se fusionaban precisamente durante la combustión, así quedaba claro que la atmósfera o el aire

estaba formado por estos tres elementos principalmente, aunque luego, ya bien entrado el siglo XIX, se descubrirían otros de los gases que junto con el CO_2 , corresponden al 1% de la composición del aire.

Por otra parte, Lavoisier repitió un experimento de Henry Cavendish que al hacer arder otro gas inflamable en el aire, recogió vapores que al condensarse resultaban ser agua, este otro elemento inflamable, que también tenía la propiedad de combinarse con el oxígeno, fue llamado hidrógeno (formador de agua) por su significado en griego.

Uno de los aspectos más importantes de los descubrimientos que se hicieron en ese entonces fue conocer la capacidad del carbono y del hidrógeno de combinarse con el oxígeno, con el primero forma el CO_2 que si bien corresponde solo al 0.03% de la atmósfera juega un rol importantísimo en el ciclo vital; por otro lado, el oxígeno combinándose con el hidrógeno forma el agua, que es el otro elemento absolutamente necesario para la vida.

Fue también Lavoisier quien se dedicó a hacer los primeros análisis de diferentes alimentos y pudo constatar que todos ellos estaban compuestos básicamente de Carbono e Hidrógeno; no fue muy difícil deducir que al entrar en el organismo estos se combinan lentamente con el oxígeno que se introducen al cuerpo a través de la respiración y poco a poco van formando los dos compuestos de desecho de la combustión, que en este caso se llama oxidación, que son, como ya se ha dicho el Bióxido de Carbono CO_2 y el Agua (H_2O).

Ahora bien, ¿si todos los animales consumimos oxígeno y liberamos bióxido de carbono, como es posible que aún hoy la atmósfera siga teniendo principalmente nitrógeno y oxígeno y no bióxido de Carbono?, cabría pensar que nuestra atmósfera es finita y, dada la cantidad de animales y plantas que respiran en el planeta, nuestra atmósfera sufra un desequilibrio, pero realmente no es así.

Para dar respuesta a estas preguntas nos remitiremos al origen de la vida, que, como hemos visto está relacionado con la atmósfera. El primero en sugerir que la vida se formó en una atmósfera diferente a la actual fue el químico inglés John B.S. Haldane cuando observó que si la vida era la causante del oxígeno de la atmósfera, ésta tenía que haber empezado necesariamente en una atmósfera sin este elemento. El primer químico en intentar imitar las condiciones primordiales en un experimento fue Calvin, sin embargo sus resultados, aunque prometedores pues mostraban una clara dirección hacia la creación de vida habiendo generado algunas moléculas orgánicas, fueron solo prometedores. Calvin utilizó una mezcla de una atmósfera mucho más evolucionada que la que se considera la primera atmósfera de la tierra y utilizó, como fuente de energía, unos isótopos radioactivos. (Asimov, 1968)

Posteriormente, ya en la mitad del siglo XX, con tecnologías mucho más especializadas, se logra poner a prueba una teoría mucho más audaz y es que la vida se inició cuando se produjo la primera atmósfera

alrededor del planeta. Se asume que la fuente de energía debió haber sido la radiación ultravioleta, única energía que llegaba a todas partes del planeta y bañaba toda la superficie terrestre por varias horas al día. Como este tipo de radiación no es capaz de atravesar la capa de ozono, necesariamente tenía que haberse creado en una atmósfera que careciera de esta capa y que contuviera muchos más elementos de los que utilizó Calvin.

Esta vez el encargado de hacer el experimento sería Stanley Lloyd Miller y aunque tampoco pudo utilizar energía ultravioleta, incluso utilizando energía parecida a la que se da con los rayos naturales de luz, logró resultados impactantes: antes de cumplirse un día completo se podía ver cómo iban sucediendo cosas y al hacer las pruebas de cromatografía pudo observar que había logrado crear varias sustancias orgánicas y algunas muy importantes además de las moléculas simples que Calvin había logrado. Lo más impactante fue que además de la creación de ácido láctico, acético o el glicólico, Miller logró la creación de dos aminoácidos que, como se sabe, son la base de las moléculas proteínicas grandes.

Posteriormente se vería que en el laboratorio era perfectamente posible crear materias primas tan importantes como el ATP partiendo de una mezcla primordial es decir de la primera atmósfera, carente de vida.

A pesar de todos estos conocimientos y prácticas, resulta imposible saber cuál fue el primer compuesto vivo que fue capaz de reproducirse, sin embargo se sabe que los compuestos que hacen esto, pertenecen a la clase de los ácidos nucleicos, por lo que es factible que la primera molécula reproductora fuera un simple ácido nucleico, por otra parte, también se conocen otro tipo de organismos que no tienen ácido nucleico, son células proteínicas que son ineficaces para la reproducción pero contienen una muy buena fuente de alimento y es muy probable que la vida se haya desarrollado en esos dos sentidos.

La teoría dice estas dos moléculas se podrían haber unido ingiriendo la más grande a la más pequeña y después de varios millones de repeticiones de esta especie de absorción del ácido nucleico por parte de la molécula proteínica, se adaptasen tan bien entre ellas que logran aprovechar las capacidades de ambas al máximo. Esta nueva célula con ácido nucleico combinaría la capacidad reproductora del ácido nucleico con el depósito de sustancias vitales de la propia célula y la combinación de ambas sería mucho más eficaz que cualquiera de las dos moléculas separadas.

De esta célula descenderían todas las demás células que existen en la actualidad y queda claro que ésta pudo haberse desarrollado ya en la primera atmósfera, la misma que en un constante proceso evolutivo se transformaba lentamente pasando a ser una atmósfera diferente gracias a la disociación del agua que producía oxígeno en forma libre y parte de él se convertía en ozono, que a su vez, al elevarse por encima de la tropósfera, fue creando una capa que no permite que los rayos ultravioletas pasaran hacia la superficie terrestre.

Necesariamente, en este proceso de evolución de la atmósfera, estas células primigenias tuvieron que haber seguido ellas mismas un proceso de adaptación a lo que estaba ocurriendo, por lo que es muy probable que se hayan dado formas muy primitivas de fotosíntesis por ejemplo a través de las porfirinas³³ de magnesio con capacidad para emplear la energía de la luz visible para la construcción de compuestos complejos en base a otros mucho más simples. (Asimov, 1968)

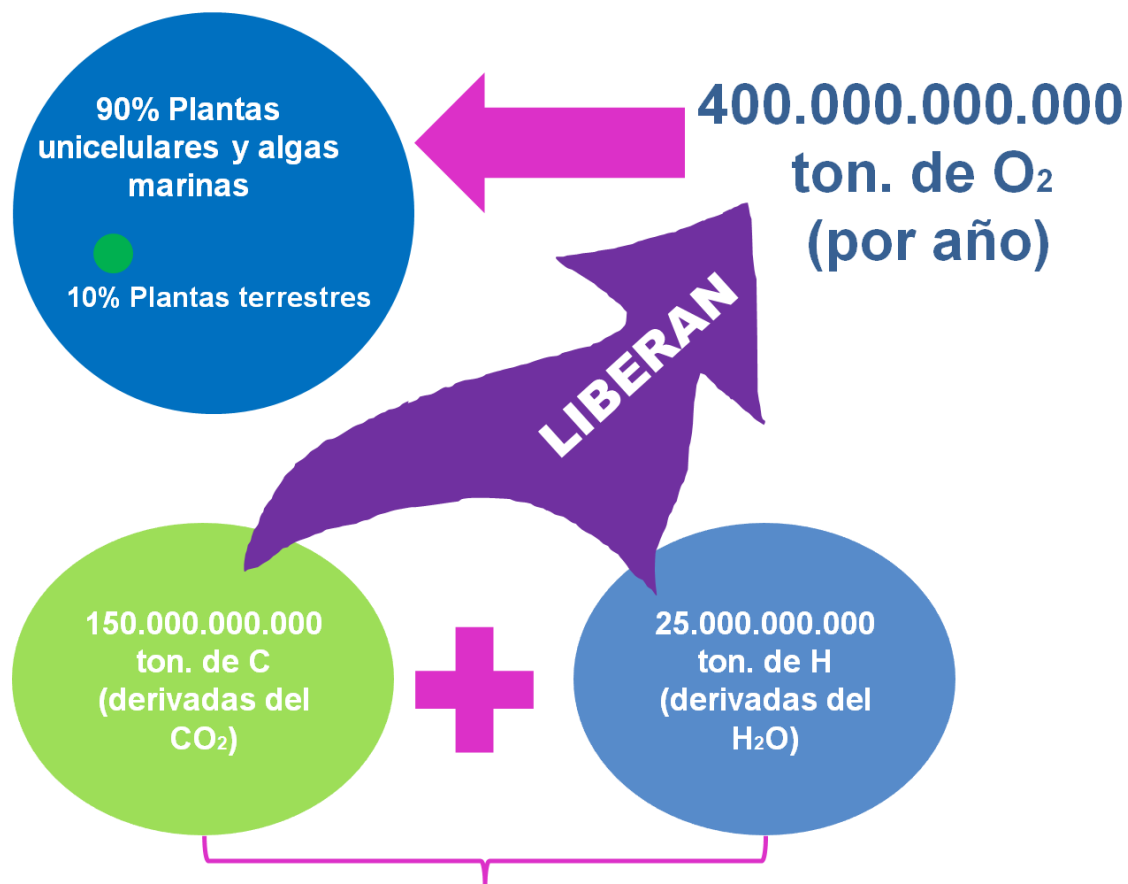
Esta capacidad de síntesis a partir de la luz debió haber dado una enorme ventaja a las primeras células fotosintéticas incluso si éstas no eran del todo eficientes, y todas las células fotosintetizadoras que conocemos en la actualidad pudieron derivar de una célula original que pudo haber sido análoga a lo que hoy conocemos como cloroplasto; de hecho, al parecer las algas verdiazules o verde azuladas tienen un cloroplasto que bien puede ser muy similar al original.

Las algas verde azules, también conocidas como cianobacterias por su parecido con las bacterias, son células muy simples que contienen clorofila y dada sus características, podrían ser consideradas como grandes cloroplastos individuales, descendientes menos complejos del cloroplasto original. Cabría pensar que las bacterias actuales pueden haberse dedicado al parasitismo o buscar su alimento en tejidos muertos al carecer de la clorofila.

Durante la aparición de las mencionadas algas, el oxígeno en la atmósfera era muy escaso, en cambio la concentración de bióxido de carbono pasó de 3KPa en ese entonces a los 3Pa actuales, lo que representa solo un pequeño porcentaje de lo que era al inicio de la vida en el planeta, hace aproximadamente 3450 millones de años.

Por todo lo anterior, parece que fueron las cianobacterias, las responsables de la creación de la atmósfera que aproximadamente hace 2000 millones de años permitió la aparición de las primeras algas y posteriormente, aproximadamente 1000 millones de años después, alcanzó niveles de oxígeno similares al actual, al mismo tiempo que se iniciaba la formación de la capa vegetal en la corteza terrestre, que data de hace unos 1200 millones de años, tiempo que viene aportando a su vez oxígeno a la atmósfera.

³³ Las porfirinas son compuestos que contienen el anillo de anillos, llamado así por que une anillos de pirrol, que a su vez forman parte de la estructura molecular de la clorofila. Las porfirinas no existen en los tejidos vivos pero forma parte importante del ciclo del carbono; se encuentran en la familia de proteínas llamadas citocromos, que son indispensables para la producción de energía.



✍ 📄 ➡

Ilustración 48.- Esquema de la producción de oxígeno biogénico, según Eugene I. Rabinovich (Asimov, 1973)

En su libro de Introducción a la Ciencia, Isaac Asimov cita al Eugene Rabinovich (Asimov, 1973) como uno de los más importantes investigadores de la fotosíntesis, que resume la producción de oxígeno en el planeta de la manera que está esquematizada en la ilustración 48, siendo las algas marinas y las plantas unicelulares las protagonistas indiscutibles de la proliferación de oxígeno en la atmósfera.

Como se puede observar, el oxígeno liberado por los organismos fotosintéticos es mucho mayor que la suma de los elementos que lo contenían antes de ser sintetizados, así mismo, es importante saber que la producción de oxígeno es siempre mayor al consumo metabólico del mismo, razón por la cual, la atmósfera está siempre en renovación. Para mantenerla en este estado de equilibrio permanente, es de suma importancia respetar los diferentes hábitats de los organismos que la renuevan, es decir, los mares, los lagos, ríos y las zonas de riqueza vegetal terrestre.

6.2.-Cultivo de Microalgas

En condiciones naturales, las microalgas viven en los lagos, mares y en cualquier estanque de agua, para el cultivo controlado de las mismas, es importante imitar lo mejor posible a la naturaleza y, dependiendo del objetivo final del cultivo, mejorar algunas condiciones, como el tiempo de iluminación, la temperatura o los niveles de nutrición para lograr una eficiencia mayor, según sea el caso.

A continuación se muestran las diferentes configuraciones de reactores biológicos para el cultivo de las microalgas en una situación controlada, sin embargo, dado que las variables para elegir la especie de microalgas adecuadas para el cultivo son demasiadas y están relacionadas más con la especialidad de biología que con la arquitectura o el confort y la calidad de aire, no se analizarán las especies que podrían servir a la propuesta, limitando el área de investigación al conocimiento de los biorreactores y las características de los mismos. Es importante saber que el cultivo de microalgas puede hacerse tanto en estanques abiertos, como en cerrados llamados fotobiorreactores, y los hay de muchas formas y configuraciones, dado que ambos tienen características tanto positivas como negativas a continuación se mostrarán, además, las ventajas y desventajas de ellos.

6.2.1.-Lagunas Abiertas

Las lagunas abiertas (LA) son estanques de agua poco profundos, generalmente de unos 15 a 30 cms de profundidad, en general presentan una forma alargada, dividida en dos canales, con los extremos curvos o elipsoidales que permiten la unión de ambos canales y el flujo del cultivo de uno a otro canal. Pueden ser construidas con hormigón armado o con tierra apisonada y sellada e impermeabilizada con plástico grueso de color blanco. Deben contar con un sistema de mezclado constante para evitar la sedimentación de la biomasa, que suele estar formado por paletas radiales, como un molino desde el cual también se alimenta el cultivo.

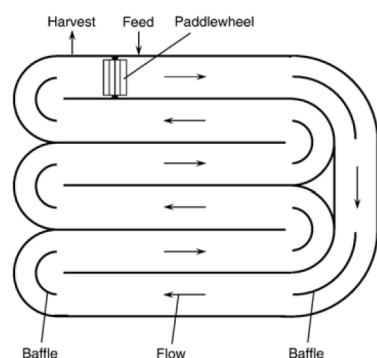


Fig. 1. Aerial view of a raceway pond.



Ilustración 49.- Esquema de una laguna abierta (Chisti, 2007) y fotografía del mezclador del cultivo

Suelen ser relativamente baratas y son el tipo de cultivo más común hasta ahora.

Los problemas de las LA o estanques están relacionados con la cantidad de agua que es necesaria ya que dado que la superficie expuesta es muy grande, la evaporación de agua es también mucho mayor, esta gran superficie expuesta a la intemperie también afecta en la cantidad de CO₂ necesario ya que este también tiene una clara tendencia a perderse por difusión en la atmósfera, tienen un deficiente sistema de mezclado y son susceptibles a la contaminarse con otras especies o con organismos que se alimentan de algas, los costos de recuperación del producto de medios diluidos es alto y existe dificultad para el control de la temperatura y el pH. (Loera-Quezada & Olguín, 2010).

Otra de las desventajas de las LAs, es que necesitan una gran cantidad de terreno y tienen que ser desarrolladas en porciones planas ya que obviamente resulta imposible construirlas en pendientes mayores y mucho menos en desarrollos verticales.

Si bien las lagunas son mucho más baratas, su productividad es mucho menor que la de los cultivos realizados en fotobiorreactores, la industria más grande que actualmente desarrolla cultivos de microalgas tiene alrededor de 440 mil m² y pertenece a la empresa Earthrise Nutritionals (www.earthrise.com), que se dedica a la industria alimenticia.



Ilustración 50.- Vista aérea de una laguna abierta para el cultivo de microalgas *Raceway Ponds for Microalgae Production* (Earthrise Farms, California, USA)

Las lagunas abiertas son la opción más barata para el cultivo de las microlagas pero para el presente trabajo, la mayor desventaja que presentan de las lagunas abiertas es la imposibilidad de capturar el

oxígeno que producen ya que este se va incorporando a la atmosfera de manera natural, a medida que es producido.

6.2.2.- Fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son sistemas cerrados de diversas formas y materiales, generalmente forman una matriz de tubos cilíndricos rectos que pueden ser hechos de vidrio o de plástico, aunque también hay biorreactores planos de las más diversas formas.

Dado que el cultivo está controlado en el interior de los fotobiorreactores, la versatilidad del mismo es muy amplia pudiéndose colocar casi en cualquier superficie preparada para recibir el peso, sea esta horizontal, vertical o inclinada en cualquier ángulo.

En esta matriz, de material transparente, es donde se captura la luz solar por lo que el diámetro de los tubos no debe ser mayor³⁴ a 10 cms para permitir la penetración de la luz cuando el cultivo es muy denso y dado que la luz es la energía que se utiliza para lograr la fotosíntesis, es necesario asegurarse que la esta penetre para mantener una buena productividad de biomasa. (Chisti, 2007)

Con el objetivo de capturar la mayor cantidad de luz posible, los fotobiorreactores deben estar orientados con el eje de norte a sur, de tal manera que reciban toda la luz desde el amanecer hasta el crepúsculo. (Ilustración 51)

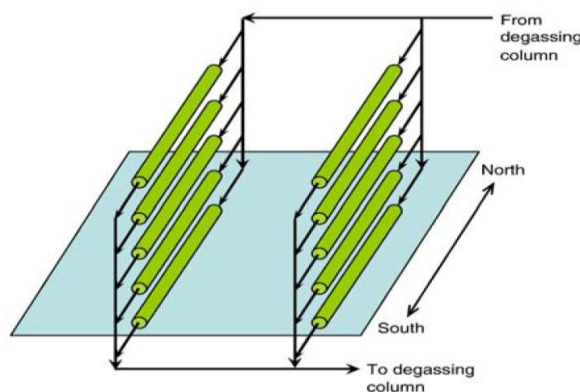


Ilustración 51.- Esquema de un fotobiorreactor, su orientación y disposición en terreno (Chisti, 2007)

Especialmente en latitudes donde la cantidad de luz es menor, las que están más allá de los trópicos y cercanas a los polos, es necesario incrementar sistemas que ayuden a captar la luz solar durante la mayor cantidad de horas posible por lo que se pueden usar estrategias tan sencillas como pintar las

³⁴Este es un grosor de fotobiooreactor que propone Chistem sin embargo, por la bibliografía y fotografías consultadas, la industria utiliza grosores mayores. Se respeta la cita.

superficies que rodean a los fotobiorreactores de blanco y lograr así que la luz se refleje hacia ellos (Chisti, 2007) o sistemas tan complejos como la implementación de un fotobiorreactor móvil que tenga la capacidad de moverse para seguir la trayectoria solar, o en su caso, evitarla. (Hindersin et al., 2012)

Tanto en las latitudes muy altas como en las más bajas se puede producir el efecto de la foto inhibición que se presenta cuando las microalgas reciben tanta radiación solar que dejan de realizar la fotosíntesis, esto tiene como resultado una reducción en los niveles de productividad tanto de oxígeno como de biomasa, por lo que es necesario evitarlo especialmente cuando el caldo de cultivo es poco denso, en caso de un cultivo con mayor densidad, existe menos posibilidad de foto inhibición ya que los mismos microorganismos se dan sombra entre ellos. La foto inhibición puede ser controlada ya sea implementando sombras o provocando movimiento en el foto biorreactor para evitar que los rayos del sol lo iluminen constantemente.

Como se ha dicho anteriormente, las microalgas producen O_2 como subproducto y un exceso de este gas dentro de los biorreactores también puede producir que las microalgas empiecen un proceso de respiración consumiendo oxígeno en vez de producirlo e interrumpiendo la producción de biomasa, para evitar esto es necesario que los biorreactores se construyan de tal manera que cuenten con una zona de desgasificación, así que se debe prever un volumen de reserva por donde, al circular el cultivo, este se desgasifique y luego fluya a la zona tubular para continuar con la producción (ver ilustración 52).

El oxígeno que se genera a través de la fotosíntesis se aproxima a $10g\ O_2\ m^3/\ min$ (Chisti, 2007), y una cantidad de oxígeno disuelto mayor que el de la saturación del aire inhibe la fotosíntesis, (Molina et al., 2001). Peor aún, si está combinado con una radiación muy fuerte puede producir un daño foto exudativo a la biomasa, por lo que el cultivo no puede tener concentraciones mayores a un 400% de la correspondiente a la saturación de aire. Esto limita el largo del sistema antes de la desgasificación, que en general no debe ser mayor a 80 m en total. (Chisti, 2007)

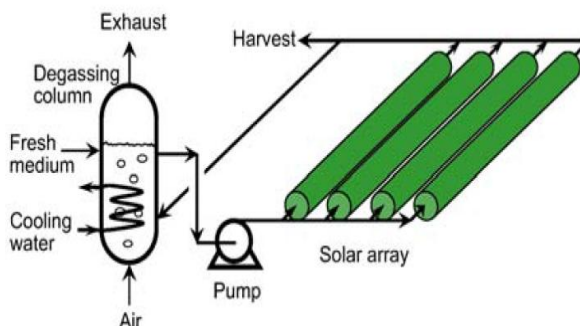


Ilustración 52.- Esquema de un fotobiorreactor con la columna para desgasificación del cultivo (eliminación y captura del O_2 (Chisti, 2007)

Es importante sin embargo que esta zona de desgasificación se mantenga relativamente pequeña ya que suele estar en una zona menos iluminada y este cambio en la luminosidad puede afectar la producción de biomasa. Otro elemento a tomar en cuenta es la necesidad de mantener el nivel de pH controlado, dado que este se incrementa con el consumo del CO_2 , es necesario inyectar un flujo de CO_2 hacia la mezcla cada cierto tiempo a través de la zona de desgasificación, exceptuando en los casos en los que se utilice, para el cultivo, agua rica en materia orgánica que no requiera nutrirse adicionalmente con CO_2 .

Generalmente, la circulación se realiza en un circuito cerrado y debe contar con una bomba que sea capaz de mantener el cultivo en movimiento por todos los tubos. Los fotobiorreactores pueden colocarse en un soporte que permita que estos formen una pared de elementos horizontales o verticales si se toma en cuenta que todos deben estar directamente iluminados por la luz solar aunque eventualmente reciban la sombra del tubo vecino. La versatilidad de los fotobiorreactores es prácticamente infinita ya que su diseño se realiza según las condiciones de cada lugar, los objetivos de cada proyecto y la creatividad de los diseñadores responsables de cada proyecto.

Los fotobiorreactores cerrados tienen la ventaja de permitir un control más estricto de la temperatura y el pH, evitan o disminuyen el riesgo de que el cultivo se contamine, lo que ha permitido producciones a gran escala de una sola especie en estos, también permiten la iluminación artificial en caso de ser necesario, aunque esta última opción no es muy aconsejable por el gasto energético que implica.

Es necesario prever la forma de controlar la temperatura del cultivo dentro del biorreactor, dado que éstos son cerrados, el calor dentro de ellos no se disipa por lo que durante las horas del día y especialmente durante las horas de mayor radiación, es necesario lograr que la temperatura no suba a extremos que perjudiquen el desarrollo del cultivo.

Aunque la capacidad de adaptarse a ciertas temperaturas dependerá de la especie que se cultive y de cuan resistente sea esta al calor, un medio demasiado caliente puede impedir un desarrollo óptimo del cultivo. (Hindersin et al., 2012)

La solución a las altas temperaturas del cultivo en zonas de altura puede ser un problema con una solución relativamente sencilla, puesto que en general son lugares en los cuales el aire es muy frío. Es muy típico que en una zona de montaña cuando se está al sol se sienta mucho calor e inmediatamente, cuando se pasa a la sombra se siente mucho frío. Esto se debe a que la radiación suele ser muy fuerte pero el aire muy frío, por lo que una solución podría ser mantener el fotobiorreactor en áreas sombreadas o parcialmente sombreadas. Dado que el cultivo está constantemente en movimiento, la sombra evitaría que la temperatura del cultivo suba exageradamente.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que en zonas de altura, durante las horas de la noche la temperatura tiende a bajar considerablemente, en el caso de La Paz, las madrugadas suelen ser las horas del día más frías, llegando a extremos de hasta -8°C en los meses de invierno. Aunque se asume que las especies deben estar necesariamente adaptadas al medio, es importante tomar en cuenta que en un medio natural los microorganismos se pueden mover para mejorar sus condiciones tanto de temperatura como de luz, simplemente cambiando de profundidad, pero en un fotobiorreactor los microorganismos están atrapados en distancias muy pequeñas por lo que, al momento de implementar este tipo de sistemas se deben dar las soluciones pertinentes.

Otro tema a tomar en cuenta es que los biorreactores necesitan un flujo con movimiento constante para evitar la sedimentación por lo que es necesario contar con una bomba de burbujeo que sea suave con la mezcla y no dañe las células pero que produzca al mismo tiempo mucha turbulencia que es exactamente lo que se busca, también hay que tener en cuenta que las bombas de burbujeo necesitan una entrada de aire y son menos flexibles que las mecánicas comunes. (Molina et al., 2001). Es posible que la mejor solución esté en un punto intermedio, logrando el uso híbrido de ambos sistemas, como plantea Ryan, citado por (Loera-Quezada & Olguín, 2010), aunque habría que analizar la factibilidad según las características del proyecto.

Otro aspecto de los fotobiorreactores que es muy importante es la posibilidad de construirlos en diferentes posiciones y geometrías, para efectos del presente trabajo esto resulta sumamente importante porque permite posicionarlos en relación a las edificaciones ya existentes o por diseñar, ya sea como elementos de fachada o cubierta, como elementos soportados por estas o incluso como elementos independientes a lo largo de zonas ajardinadas en las más diversas formas, un ejemplo de esto son los dos fotobiorreactores construidos en el Laboratorio del Centro Académico y Universitario en Nove Hradý, República Checa. (Masojídek et al., 2009) (Masojídek et al., 2003)



Ilustración 53.- Paneles de vidrio que permiten una iluminación natural de los Fotobiorreactores construidos en el laboratorio del Centro Académico y Universitario en Nove Hradý, República Checa. (Masojídek et al., 2009)

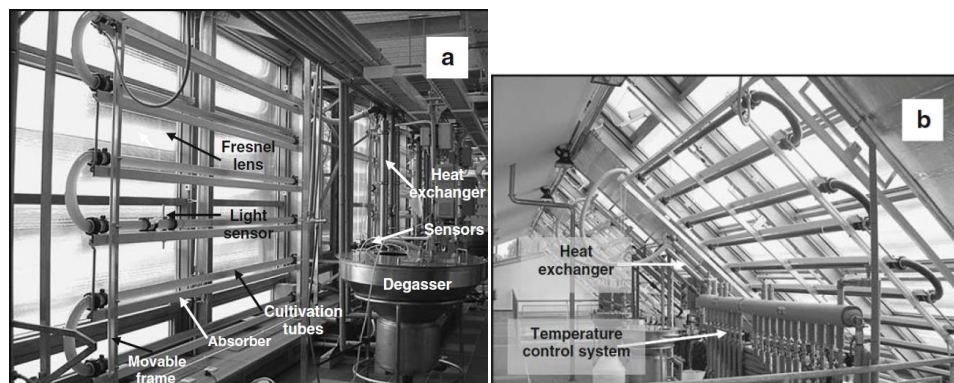


Ilustración 54.- Vistas interiores del mismo proyecto (Masojídek et al., 2009)

El diseño de los fotobiorreactores puede ser mejorado con diversos elementos, como por ejemplo, el uso de lentes que concentran la luz para luego ser reflejada hacia el cultivo (Zijffers et al., 2008). Aunque no todas las soluciones son factibles desde el punto de vista económico, el diseño de fotobiorreactores es una especialidad muy reciente por lo que será interesante ver lo que está por hacerse.

Por el momento, es importante tener en cuenta que tenemos la necesidad de involucrarnos en la solución a problemas como la contaminación ambiental ya sea atmosférica o del agua y los fotobiorreactores deben necesariamente ser parte de esta solución. El esquema presentado a continuación es muy útil ya que tiene en cuenta la captura y reciclaje del CO₂ producido por una industria y el reciclaje del agua del circuito, así como la producción de biocarburantes renovables.

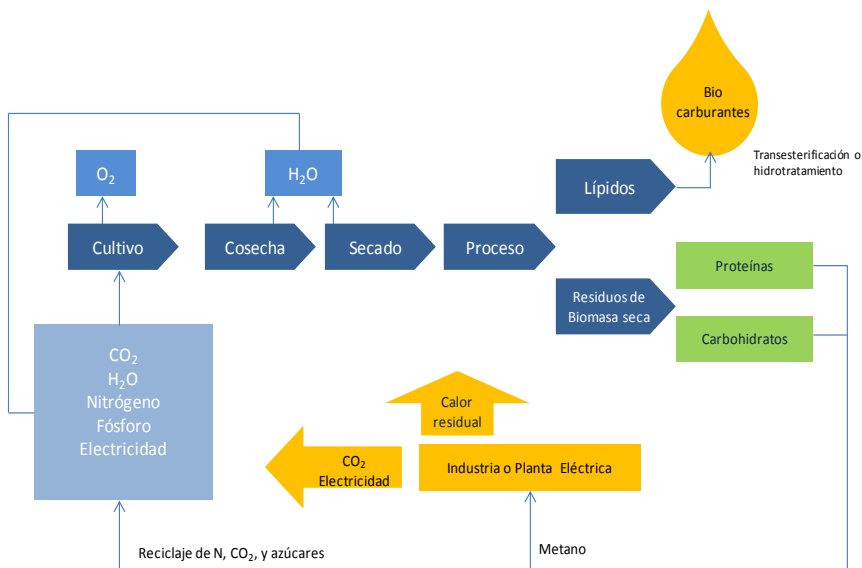


Ilustración 55.- Un proceso integrativo de biocarburante algal debe capturar CO₂ de una planta de energía o una industria, obtener los nutrientes de las aguas residuales u otra fuente de agua no potable e incorporar un reciclaje significativo. (Knoshaug & Darzins, 2011)

Para terminar con la comparación entre las lagunas abiertas y los fotobiorreactores, la siguiente ilustración nos muestra las diferencias entre los cultivos en lagunas abiertas y fotobiorreactores. Como se puede apreciar en la misma, el cultivo en los fotobiorreactores es mucho más eficiente que en los estanques o lagunas abiertas, por cada hectárea de cultivo los fotobiorreactores producen mucho más rendimiento que las lagunas en una proporción aproximada de 13 unidades más; por otro lado, es mucho más fácil y barato recuperar la biomasa ya en las lagunas la biomasa está más diluida, y aunque hay una alto volumen total, hay poca masa. La cantidad de biomasa en los fotobiorreactores es 300 veces mayor que en las lagunas. Este es un argumento muy importante a favor de los fotobiorreactores ya que uno de los procesos que más incrementa el costo del producto final es precisamente el de la cosecha, que contribuye con un 40% al precio total del producto. (Loera-Quezada & Olguín, 2010)

Variable	Fotobiorreactor	Lagunas abiertas
Producción de biomasa anual(Kg)	100	100
Productividad Volumétrica (Kg/m ³ d)	1.535	0.117
Productividad por superficie (Kg/ m ² d ¹)	0.048 ^a 0.072 ^c	0.035 ^b
Concentración de biomasa en caldo (Kg/m ³)	4	0.14
Tasa de dilución (d)	0.384	0.25
Superficie necesaria (m ²)	5681	7828
Rendimiento de aceite (m ³ / ha)	136.9 ^d 58.7 ^e	99.4 ^d 42.6 ^e
Consumo de CO ₂ por año (Kg)	183.333	183.333
Geometría del sistema	132 tubos II/Ud Longitud de 80 m. Diámetro de 6 cms.	978 m2/laguna 12 m x 82m 0.30 m profundidad
Cantidad de unidades	6	8

^a Basado en el área real

^b Basado en laguna existente

^c Basado en proyectos fotobiorreactores

^d Basado en 70% de peso del lípido en la biomasa*

^e Basado en 30% de peso del lípido en la biomasa

Ilustración 56.- Comparativa entre las características de los cultivos en lagunas y fotobiorreactores (Chisti, 2007)

Finalmente, a modo de resumen se presenta el siguiente esquema comparativo entre un sistema y otro que se ha elaborado en base a la información lograda a través de la bibliografía consultada (Molina et al., 2001), (Chisti, 2007), (Loera-Quezada & Olguín, 2010), (Slegers et al., 2011), (Knoshaug & Darzins, 2011), (Masojídek et al., 2009), así como en lo que se propondrá en el presente trabajo.

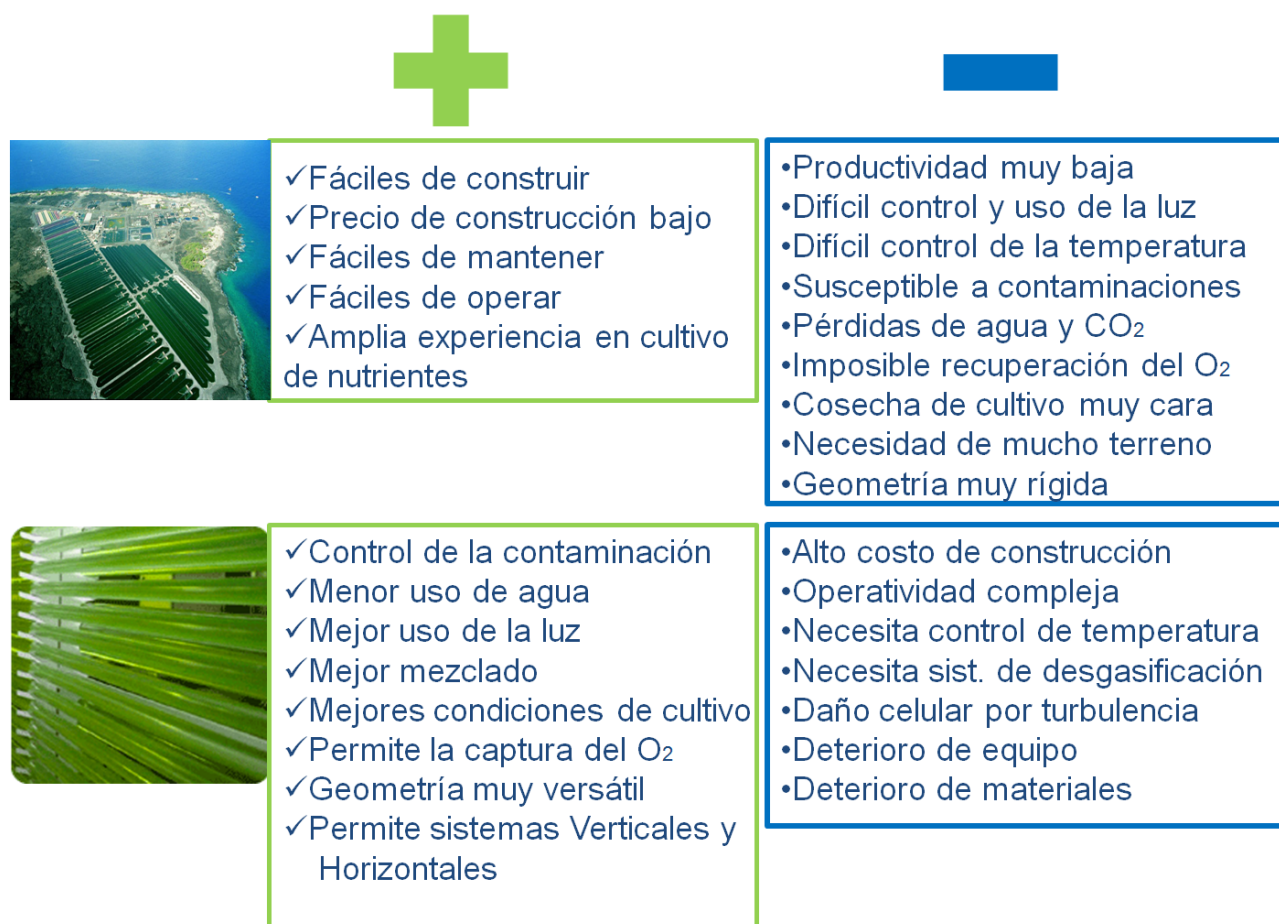


Ilustración 57.- Resumen de las ventajas y desventajas de ambos sistemas en relación al presente trabajo, elaboración propia en base a toda la bibliografía consultada.

6.3.- Mediciones de oxígeno

Con el objetivo de conocer las cantidades aproximadas de oxígeno que se producen en los cultivos controlados y utilizar esta información para la propuesta del presente trabajo, se han revisado varios documentos tanto teóricos como experimentales los mismos que están detallados en el anexo 1. Cada

unas de dichas investigaciones se han realizado en condiciones diferentes tanto de luz como de temperatura y la mayoría de ellas han sido realizadas en latitudes por encima de los trópicos, por lo que realmente no se ha podido encontrar trabajos que puedan simular las condiciones de luz o temperatura de la Ciudad de La Paz, Bolivia.

Esto se debe a que la mayor parte de la investigación relacionada con microalgas está siendo desarrollada en los países europeos o de Norte América, ya que aquella desarrollada en los países de América del Sur o de Centro América es muy incipiente y es difícil acceder a los resultados obtenidos por tales investigaciones.

Sin embargo, los documentos consultados en general dan producciones promedio de oxígeno que son consistentes en la mayoría de los casos por lo que se asume que los datos promedios nos pueden dar una producción de oxígeno biogénico bastante parecida a la realidad que aunque realicen en diferentes condiciones de luz, temperatura y medio, son datos iniciales que ayudarán posteriormente a cuantificar la producción de O_2 para su aplicación al proyecto.

En cualquier caso es muy importante tener en cuenta que se han realizado los cálculos con producciones de oxígeno estimados y que en caso de implementar un sistema parecido es necesario hacer pruebas de producción de oxígeno con las condiciones del sitio.

Capítulo 7

7.- Propuesta: Mejorar la calidad del aire en Altura

En los capítulos anteriores se ha intentado abarcar todos los factores que influyen en el confort respiratorio del habitante de las zonas de altura, se ha visto, por ejemplo, que el hecho de vivir en la altitud puede provocar afecciones a la salud de los seres humanos desde muy temprana edad e incluso puede afectar a la salud de la madre y los recién nacidos, también hemos visto como puede afectar negativamente al bienestar inmediato, por ejemplo, al reducir la capacidad de las personas de realizar ciertos ejercicios o cualquier tipo de esfuerzo físico.

El presente capítulo representa la propuesta con base en la idea de que así como se busca el confort térmico, el lumínico, o cualquier otro, es muy importante buscar el confort respiratorio para las zonas de altura, toda vez que este no solo mejorará el bienestar inmediato en las personas sino que proporcionará la posibilidad de evitar patologías que pueden ir desde muy ligeras hasta muy graves, evitando, en algunos casos, que los afectados tengan que migrar a zonas más bajas en búsqueda de un mayor confort respiratorio.

El objetivo, como se ha explicado con anterioridad, es mejorar la calidad de aire en las zonas de altura, el mismo que se asume como poco adecuado por la carencia de oxígeno, así, se propone la mejora del aire interior a través del enriquecimiento del mismo con oxígeno biogénico producido por microalgas.

La razón del uso del oxígeno biogénico se basa, por una parte, en la gran eficiencia de las microalgas para producirlo, en el hecho de que la energía utilizada es la luz solar y las materias primas son el agua y el CO_2 , es decir que no implica ninguna energía adicional, el agua puede ser de cualquier tipo, incluidas las aguas grises, y el CO_2 puede ser extraído de la misma atmósfera o de una industria cercana, lo que implica que las materias primas pueden ser elementos de desecho que el ser humano necesita reciclar y que el uso de las mismas implica, de hecho, un aporte positivo al medio ambiente.

Otra razón para elegir la opción del uso de oxígeno biogénico es que las algas, al realizar la fotosíntesis crean biomasa, la misma que puede ser utilizada para la elaboración de un abanico muy grande de productos como por ejemplo nutrientes para mejorar la alimentación humana, para ser utilizados en medicina y cosmética o lípidos para la producción de biocarburantes.

El siguiente esquema, explica el alcance de la propuesta, la misma que si bien está centrada en mejorar la calidad de aire, es consciente de los otros beneficios que el cultivo de microalgas conlleva.

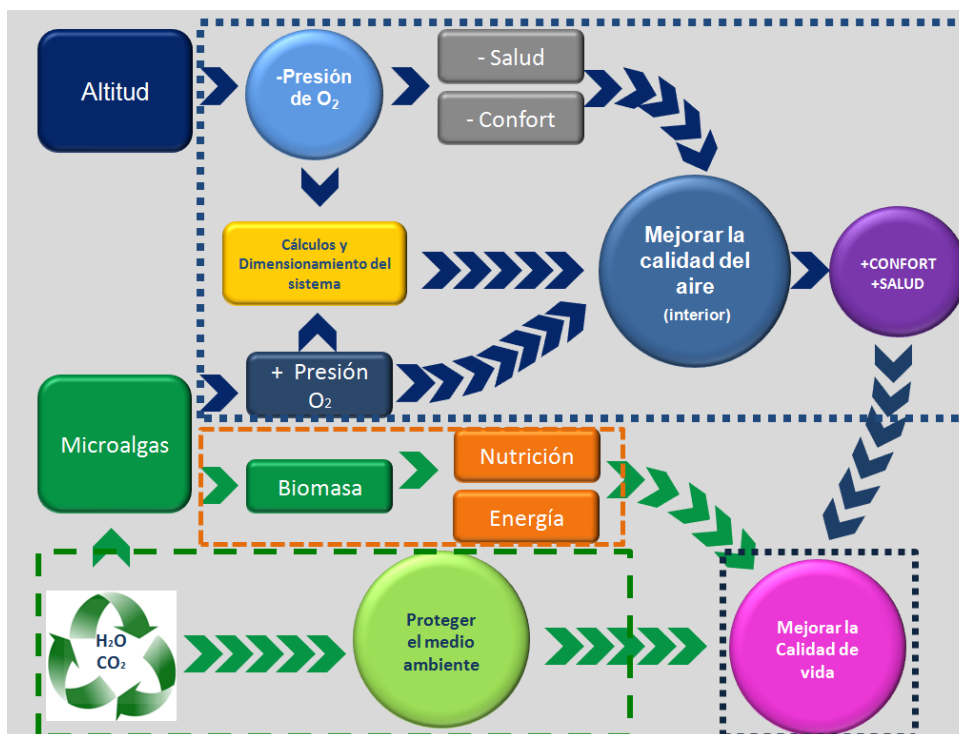


Ilustración 58.- Esquema general de la Propuesta, elaboración propia.

En el esquema general, la línea azul clara demarca el objetivo principal de la presente propuesta, la línea naranja los productos básicos que se pueden obtener a través de la producción de biomasa algal, la línea verde las ventajas medioambientales y por último la línea azul oscura acentúa el hecho de que todo el sistema o cualquiera de sus partes tiene una incidencia directa sobre la calidad de vida.

A continuación se explicará cada una de las partes del esquema y el dimensionamiento del mismo.

7.1.- Relación entre la Presión de O₂, la altitud y el confort.

Como se ha visto, a medida que la altura es mayor, la presión atmosférica decrece y proporcionalmente lo hace la Presión de Oxígeno (PO₂). En los capítulos anteriores, se puede verificar que tanto la densidad de aire como la cantidad de O₂ baja bruscamente a medida que se incrementa la altitud, se observa por ejemplo que mientras en el nivel del mar hay 0.25 Kg de O₂ por cada metro cubico de aire, en la Ciudad de México hay solo 0.19 Kg, en Toluca 0.18 Kg; en La Paz Bolivia 0.16 Kg y por último en La Rinconada, Perú, el lugar poblado más alto del planeta, solo 0.14 Kg. lo que significa 10 Kg. menos que a nivel del mar. (Ilustración 25, página 52)

Si a esto le añadimos el hecho, explicado en el capítulo 2, que la presión de O₂ se sigue reduciendo a medida que llega hasta los alveolos debido a los cambios de temperatura y humedad que sufre el aire en las vías respiratorias, esto provoca que la presión arterial sea 47 mmHg menor que la presión de oxígeno

en el aire exterior (PO_2) diferencia de presión que se da dentro del organismo a cualquier altitud. Esto significa que a mayor altitud la presión alveolar se reducirá aún más llegando un momento en el que la diferencia de presiones ya no será suficiente para el intercambio gaseoso, es decir que la respiración humana será imposible, tal como se muestra en la siguiente ilustración.

Lugar	Altitud (msnm)	Presión At. (mmHg)	PO_2 (mmHg)	PAO_2 (Saturada a 37°C)(mmHg)
Nivel del mar	0.00	760	160	150
Ciudad de México	2,300	574	121	111
Adis Abeba, Etiopía	2,500	560	118	108
Toluca México	2,680	548	115	105
Bogotá, Colombia	2,680	548	115	105
Dege, China	3,100	519	109	99
Cuzco, Perú	3,400	500	105	95
La Quiaca, Argentina	3,440	497	104	95
Namche Bazaar, Nepal	3,450	496	104	94
Apartaderos, Venezuela	3,505	493	104	94
La Paz, Bolivia	3,650	484	102	92
Lhasa, Tibet	3,650	484	102	92
Huancavelica, Perú	3,680	482	101	91
Oruro, Bolivia	3,700	481	101	91
Puno, Perú	3,850	471	99	89
El Alto, Bolivia	4,000	462	97	87
Potosí, Bolivia	4,100	456	96	86
Cerro de Pasco, Perú	4,350	442	93	83
Wenchuan, China	5,000	405	85	75
La Rinconada, Perú	5,100	400	84	74
Everest	8,484	250	52	43

Ilustración 59.- Presión de Oxígeno (PO_2) en el aire y Presión alveolar de Oxígeno (PAO_2) para diferentes altitudes

Se observa que la reducción de 47 mmHg sobre la presión exterior afecta cada vez más a medida que se asciende, por ejemplo una persona a unos 3100 m de altura estará respirando solo 2/3 de lo que respiraría a nivel del mar y si estuviera a unos 5000 metros, respiraría solo la mitad de O_2 que a nivel del mar. Nótese que al llegar al Everest la presión alveolar de oxígeno (PAO_2) es de apenas 43mmHg, y la presión capilar alrededor de los alvéolos es de 46 mmhg, al ser más alta que en los pulmones, el intercambio gaseoso se ve interrumpido.

Esta reducción de la PAO_2 es la que determina el estrés fisiológico al que se ve sometido el cuerpo humano, y es por esta razón que se asume que la solución, para los habitantes de zonas de altura, podría estar en el enriquecimiento de aire con oxígeno en proporciones adecuadas. Es decir logrando acercar lo más posible a un flujo natural de este gas hacia el cuerpo reduciendo el estrés del organismo.

El médico fisiólogo Dr. John West, fue consultado por empresas mineras ubicadas en Chile y en Perú a más de 4000 msnm, dada la altitud de las minas, los ejecutivos decidieron que las familias de sus empleados se quedaran en lugares más bajos y que los ejecutivos llegaran a las mismas por temporadas cortas, no más de tres semanas por vez. Para evitar el malestar a los recién llegados y mantener una buena calidad de vida en las zonas mineras, el médico plantea un enriquecimiento de la atmósfera con oxígeno tomado desde el exterior, aumentando la PO_2 solo hacia el interior del edificio.

El Dr. West plantea que este incremento de oxígeno en las zonas de altura no solo representó una mejora en la calidad de vida de los habitantes de las zonas más bajas (West, 1995), pero además asegura que se ha demostrado que la elevación de la presión atmosférica hacia el interior de los ambientes resulta incluso más eficaz en el tratamiento de las enfermedades relacionadas con la altitud que la administración de oxígeno a alta concentración. (West, 1998)

Tomando en cuenta los estudios realizados por este médico especialista en Fisiología Respiratoria, es posible asumir que el enriquecimiento de la atmósfera interior de un edificio puede redundar en el bienestar de la gente que vive en altitud y puede incluso evitar la aparición de enfermedades relacionadas con la carencia de oxígeno en zonas de altura.

West plantea que con un incremento relativamente bajo se pueden lograr resultados muy interesantes ya que por cada 1% de incremento de O_2 se logra una atmósfera equivalente a 300 metros menos, lo que significa que con solo 4% lograremos una atmósfera equivalente a un lugar que está 1200 metros por debajo del lugar elegido.

Con este sencillo método se logra mejorar cualitativamente la presión de O_2 y por lo tanto la presión inhalada como la presión alveolar de O_2 se incrementa de tal forma que el estrés fisiológico se reduce considerablemente.

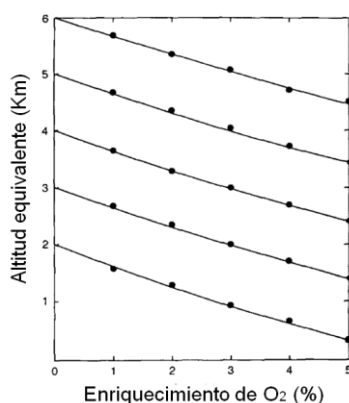


Ilustración 60.-Enriquecimiento del aire con O_2 y altitud equivalente.

Este dato proporcionado por el Dr. West es de vital importancia para el presente trabajo ya que nos permite saber el porcentaje de O_2 que debemos añadir en una ciudad de altura según la altitud a la que ésta se encuentre, teniendo este porcentaje, el cálculo de enriquecimiento de O_2 se puede realizar fácilmente.

- **Cálculo de la Altura equivalente**

Pongamos por caso la Ciudad de La Paz, en Bolivia donde muchos de sus habitantes viven por encima de los 3650 msnm, si aumentáramos sólo 3% de O_2 al aire interior de las habitaciones, lo que equivaldría a una altitud de 900 m menos, las personas estarían respirando un aire equivalente a la Ciudad de Cochabamba, Bolivia, ubicada a 2750 msnm, que cualquier habitante de La Paz considera mucho más benévola y en la cual aseguran sentirse más cómodos en relación a la altura.

Lugar	Altura Real	Altura equivalente en función al enriquecimiento con O_2				
		1%	2%	3%	4%	5%
Ciudad de México	2,300	2000	1700	1400	1100	800
Adis Abeba, Etiopía	2,500	2200	1900	1600	1300	1000
Toluca México	2,680	2380	2080	1780	1480	1180
Bogotá, Colombia	2,680	2380	2080	1780	1480	1180
Dege, China	3,100	2800	2500	2200	1900	1600
Cuzco, Perú	3,400	3100	2800	2500	2200	1900
La Quiaca, Argentina	3,440	3350	2950	2650	2350	2050
Namche Bazaar, Nepal	3,450	3150	2850	2550	2250	1950
Apartaderos, Venezuela	3,505	3205	2905	2605	2305	2005
La Paz, Bolivia	3,650	3350	3050	2750	2450	2150
Lhasa, Tibet	3,650	3350	3050	2750	2450	2150
Huancavelica, Perú	3,680	3380	3080	2780	2480	2180
Oruro, Bolivia	3,700	3400	3100	2800	2500	2200
Puno, Perú	3,850	3550	3250	2950	2650	2350
El Alto, Bolivia	4,000	3700	3400	3100	2800	2500
Potosí, Bolivia	4,100	3800	3500	3200	2900	2600
Cerro de Pasco, Perú	4,350	4050	3750	3450	3150	2850
Wenchuan, China	5,000	4700	4400	4100	3800	3500
La Rinconada, Perú	5,100	4800	4500	4200	3900	3600

Ilustración 61.-Escala de alturas equivalentes en función a la altitud real y el enriquecimiento de O_2

Realmente no existe un rango exacto de confort al que se tenga que llegar, solo es necesario saber que con un incremento mínimo de O_2 , el bienestar de las personas puede mejorar considerablemente. Es recomendable incrementar el O_2 hasta un límite en el cual las personas sientan una mejoría. Para seguir con el ejemplo de La Paz, no es necesario un incremento mayor al 3% ya que con ese porcentaje se ha llegado a un confort adecuado y un incremento mayor puede ser contraproducente.

En la anterior ilustración se dan las alturas equivalentes para enriquecimiento con oxígeno hasta un máximo del 5% para ciudades de mayor altitud pues no se recomienda un incremento mayor a ese en ningún caso dada la posibilidad de otros riesgos.

En la ilustración de alturas equivalentes se puede calcular la necesidad de incremento de O_2 según la altura donde se encuentre, en el caso más extremo, como es La Rinconada en Perú, ciudad ubicada a 5100 msnm, se observa que con un aumento del 5% se gana lo equivalente a 1500 m de altitud, lo que necesariamente significa una mejoría para la población de la zona, es incluso probable que con un incremento del 4% sea suficiente para reducir el discomfort en los habitantes de La Rinconada y se considera que una altura equivalente a 1200 m menos, es decir un incremento del 4% representaría un alivio notorio para los habitantes de cualquier ciudad sobre los 4000 m.

- **Cálculo de ventilación de ambientes (renovación de aire)**

Una vez determinada la altura equivalente a la que se quiere llegar en los ambientes interiores es muy importante hacer el cálculo de ventilación para el ambiente elegido y determinar cuántos cambios de aire necesita el espacio en cuestión, esto se realiza en función a la cantidad de gente que habita el espacio, el grado de pureza del aire exterior y del aire interior.

El enriquecimiento con O_2 debe hacerse a través de la ventilación utilizada para renovación de aire dado que éste debe ser introducido constantemente, por otra parte es importante aclarar que no es necesario hacer cálculos de ventilación cruzada puesto que los lugares altos se caracterizan por ser zonas muy frías y los cambios cruzados se utilizan para ventilar lugares cálidos húmedos.

Los pasos a seguir para dicho cálculo son los siguientes:

1.- Determinar la concentración de gases contaminantes de un espacio.

La concentración de los agentes contaminantes en un espacio será determinada por la fuente que los emite y asumiendo que es un espacio habitado por personas, la mayor fuente de contaminación es la respiración de las personas que consumen el O_2 del aire y liberan CO_2 , si además consideramos que a mayor actividad hay mayor incremento de CO_2 , y por lo tanto mayor contaminación, es importante determinar la cantidad de personas que habrán en el espacio y la actividad que llevarán a cabo en el mismo.

Para determinar la cantidad de CO_2 que se emite por persona a un espacio específico podemos utilizar la siguiente tabla:

Fuente	Actividad	Producción de CO ₂		Vapor de agua g/h por persona
		l/s Por persona	m ³ /h Por persona	
Fisiológica	Descansando	0.0041	0.015	30
Actividad adulta	Trabajo Ligero	0.006 - 0.013	0.022 - 0.047	40
	Trabajo moderado	0.013 - 0.020	0.047 - 0.072	40
	Trabajo Pesado	0.020 - 0.026	0.072 - 0.094	
	Trabajo Muy pesado	0.026 - 0.032	0.094 - 0.115	

Ilustración 62.- Tabla de Cálculo 1. Tasa de producción de CO₂ (Fuentes & Rodríguez, 2004)

2.- Determinar la tasa de ventilación para un espacio ocupado.

Una vez determinado el tipo de actividad y la producción de CO₂, debemos determinar la tasa de ventilación para el espacio dado, la misma que se calcula tomando en cuenta la concentración interior del contaminante (C_i). En este caso, asumimos que el contaminante es la producción de CO₂ por la respiración del ser humano ya que en un espacio como el que estamos planteando no se deben permitir otras fuentes de contaminación como el humo del tabaco u otros.

Entonces tenemos que:

$$C_i = C_e + S/Q_{oa}$$

donde:

C_i= Concentración Interior (Estado Constante) (μg/m³)

C_e=Concentración Exterior (μg/m³)

S=Potencial total de la fuente contaminante (μg/s)

Q_{oa}= Tasa de ventilación (m³/s)

Si despejamos la tasa de ventilación:

$$Q_{oa} = S/C_i - C_e$$

Dado que la ventilación es el único medio de cambiar el aire interior de la habitación así como de incrementar el oxígeno al aire, asumimos los valores máximos permitidos de concentración de contaminante (CO₂) y dado que el aire a introducir es un aire enriquecido, se asumen los valores calidad

de aire según la ubicación del espacio estudiado³⁵, ambos en porcentaje para facilitar el cálculo, por lo tanto:

$$Q_{oa} = S / (C_i - C_e)$$

Q_{oa} = Tasa de ventilación (m³/h)

S = Potencial total de la fuente contaminante (m³/h)

C_i = Concentración Interior de CO₂ (%)

C_e = Concentración del gas en el aire que se introduce (%)

Para calcular el tipo de aire que introduciremos al espacio, debemos tener en cuenta la zona en la que está ubicado el espacio según la siguiente tabla:

Zona	Concentración de CO ₂
Campo	0.03%
Población Mediana	0.05%
Zona Urbana	0.07%
Zona Industrial	0.09%
Zona Contaminada	0.10%

Ilustración 63.- Tabla de Cálculo 2. Nivel de Contaminación según el tipo de asentamiento.

Finalmente, para calcular la necesidad de renovación de aire, es decir las veces que se tendrá que cambiar el aire en un período de tiempo, simplemente se debe dividir la tasa total de ventilación entre el volumen del espacio estudiado

$$N = Q_{oa} / Vol.$$

Ejemplo 1.- Tasa de ventilación de aire en una habitación de 40 m².

³⁵ En caso de encontrarse en una ciudad alta pero con ambiente muy contaminado como suelen ser las ciudades mineras se recomienda tomar 0.1%, el mismo que representa el umbral a partir del cual el aire es nocivo, pero es importante tener en cuenta que en estos casos se está tratando con otros agentes contaminantes y si los niveles de contaminación fueran más altos, sería necesario contar con filtros que aseguren una ventilación con aire lo más limpio posible.

Tasa de ventilación para una persona realizando un trabajo ligero, en una zona poblada con poca polución y con la misma calcular los cambios por hora de aire en un dormitorio de 16 m² y 2,5 m de alto.

$$Q_{oa} = S / C_i - C_e$$

Q_{oa} = Tasa de ventilación (m³/h)

S = Potencial total de la fuente contaminante (m³/h) 0.022 (de tabla 1**)

C_i = Concentración Interior de CO₂ (%) 1% (máximo permitido)

C_e = Concentración del gas en el aire que se introduce (%) (0.05%) Población con poca contaminación

Entonces tenemos que:

$$Q_{oa} = 0.022 / (0.001 - 0.0005) = 44$$

Teniendo la tasa de ventilación (Q_{oa}) y el volumen (Vol) de la habitación podemos conocer el número de cambios de aire por hora:

$$N = Q_{oa} / Vol.$$

Donde:

Q_{oa} = Tasa de ventilación

N = Número de cambios de aire

Vol = Volumen de la habitación (40m³)

$$N = 44 / 40 = 1.1$$

Nótese que el ejercicio se ha realizado para una sola persona, si quisiéramos saber el número de cambios de aire para dos personas tendríamos el siguiente caso:

$$N = (2 \times 44) / 40 = 2.2$$

3. Determinar la cantidad de oxígeno para enriquecer el aire interior

Los cálculos para determinar cuánto oxígeno adicional se debe introducir en una habitación se realizarán en base a los cálculos anteriores por lo que se continúa con el ejemplo anterior:

Ejemplo 2.- Enriquecimiento del aire en Toluca.-

Teniendo en cuenta los cálculos anteriores, determinar la cantidad de oxígeno que se necesitará para enriquecer dicho espacio durante ocho horas, para el supuesto que esté ubicado en la Ciudad de Toluca y habitado por 2 personas.

Altitud de Toluca: 2680 msnm; Altitud equivalente: 2100 msnm

Porcentaje de Oxígeno a añadir: 2% (de la tabla de escalas de aire enriquecido)

$$VO_2 = N \times (Vol \times 0.02) \times nh$$

Donde VO_2 = Volumen de O_2 a añadir; N = Número de cambios de aire; Vol = Volumen de la habitación ($40m^3$); nh número de horas

$$VO_2 = 2.2 \times (40 \times 0.02) = 1.76 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Para 8 horas} = 1.76 \text{ m}^3/\text{h} \times 8 \text{ h} = 14.08 \text{ m}^3$$

Así, tendremos que para un volumen de 40 m^3 y dos personas durante ocho horas haciendo un trabajo ligero se necesitarán 14.08 m^3 de oxígeno para enriquecer la atmósfera a una altura equivalente 600 metros más bajo que la altura inicial.

Es importante aclarar que los cálculos deben hacerse sobre el total del volumen de aire y no sobre la porción de oxígeno del mismo pues el incremento, en ese caso sería mínimo.

7.2.- Adecuaciones de diseño arquitectónico y construcción

Cualquier edificación puede ser susceptible a un enriquecimiento de la atmósfera interior, desde luego los Hospitales y las Escuelas serían, a nuestro entender, las primeras en las que se debería pensar, aunque por supuesto puede ser implementado en cualquier tipo de ambientes desde casa habitación hasta oficinas, laboratorios, gimnasios, etc.

Se deben evitar ambientes donde la adición de oxígeno no sea adecuada como ser espacios muy abiertos y ventilados o espacios donde el riesgo de incendios sea mayor, como espacios donde se permita fumar, cocinas, hornos de pan, talleres mecánicos o eléctricos, etc. Es importante tener en cuenta que el O_2 puede representar cierto riesgo de incendio por su capacidad de facilitar la combustión.

El enriquecimiento de la atmósfera se puede lograr añadiendo oxígeno en proporciones adecuadas y poco peligrosas al aire a través de la ventilación, puede estar individualizado por cada habitación o por unidad construida, dependiendo del caso y puede operarse, de tal manera que se incremente o reduzca la cantidad de O_2 introducido, según sea la necesidad del ambiente, misma que puede estar determinada por la actividad que se lleva a cabo al interior o por la cantidad de gente que la esté ocupando en un momento dado; incluso podría ser individualizado según la necesidad de un enfermo, en el caso de los hospitales o las viviendas.

Es importante tener en cuenta que para evitar la pérdida del aire enriquecido, los espacios beneficiados con el mismo deben contar con una esclusa entre este y las zonas que no cuentan con enriquecimiento, de tal manera que a la hora de diseñar sería importante tener en cuenta cuales son los espacios que se beneficiarían del enriquecimiento de O_2 y crear una zona de transición cerrada entre estos y el resto del conjunto.

Incluso sería interesante, en el caso de los hospitales y las escuelas, crear una esclusa para cada habitación con aire enriquecido, de tal manera que la pérdida del gas sea minimizado al máximo.

Debe tomarse en cuenta que el O_2 se difundirá inmediatamente con el aire así que fluye a la misma velocidad del viento por lo que es importante que los ambientes con aire enriquecido tengan la ventilación muy controlada y sean tratados como espacios de alta estanqueidad.

Por otra parte, estructuralmente los fotobiorreactores requerirán de un cálculo específico ya que el peso de los mismos es considerable y se irá incrementando a medida que el cultivo se desarrolle por lo que es necesario tomar en cuenta este elemento a la hora de colocar fotobiorreactores encima de una estructura ya existente.

Así mismo, para adosarlos a una estructura vertical, o bien se debe prever una estructura específica para los fotobiorreactores o bien se debe adosarlos a una estructura que sea capaz de soportarlos.

Imágenes: esquemas de ambientes con esclusas.

7.3.- Utilización de O_2 biogénico: Producción de O_2 Cálculos y volúmenes de fotobiorreactores

Hay diferentes formas de añadir oxígeno al aire de un espacio específico y, como se ha visto, los cálculos para enriquecer el aire de un espacio son bastante sencillos, a continuación se analizará la posibilidad del enriquecimiento del aire interior con O_2 biogénico dado que, como se sabe, la idea general del trabajo es lograr, además del enriquecimiento del aire, el aprovechamiento de las ventajas que presenta el cultivo de microalgas las cuales se han listado a continuación:

- ✓ Como se ha visto, las microalgas son los organismos fotosintéticos más eficientes.
- ✓ Pueden ser cultivadas en fotobiorreactores los cuales permiten una geometría muy versátil.
- ✓ Pueden ser cultivadas en agua dulce o salada e incluso pueden desarrollarse en aguas residuales, siendo una posibilidad de alta eficiencia ecológica el uso de las mismas para limpiar las aguas residuales del mismo complejo construido.
- ✓ Ofrecen una gama muy amplia de productos finales que sirven para diferentes aspectos del bienestar humano, por lo que sería aprovechable no solo el oxígeno si no también la biomasa.
- ✓ Tiene una huella ecológica muy pequeña ya que los productos serían aprovechados en el mismo lugar donde se producen.
- ✓ Para cultivarlas, se pueden utilizar superficies que no sirven para otros cultivos como soporte de los fotobiorreactores, por ejemplo, a nivel urbano se podrían aprovechar las fachadas, cubiertas, muros de cerco, etc.
- ✓ El oxígeno excedente puede ser almacenado y/o cedido a la atmósfera
- ✓ Podrían cultivarse en zonas cercanas a industrias que eliminan CO₂ como gas residual para nutrir el cultivo con dicho gas con el beneficio respectivo para el medio ambiente.

Para poder determinar el volumen de cultivo que se necesitará para la producción de cierta cantidad aprovechable de O₂, se debe conocer la cantidad de éste gas que producen las microalgas, las condiciones necesarias para lograrlo y el tiempo que utilizan para hacerlo.

Para tal efecto, hizo una revisión bibliográfica acerca de las investigaciones realizadas por especialistas en el campo de la microbiología, las mismas que se encuentran detalladas en cuadro Anexo 1 en el que se han resumido los aspectos más importantes del cultivo de microalgas y de la producción de O₂ biogénico generado por éstas. Dicho cuadro se ha realizado con base a todos los artículos consultados de los cuales se han elegido exclusivamente los trabajos que incluían mediciones de O₂, o que aportan datos específicos que puedan servir para calcular la producción de O₂ por parte de las microalgas.

Uno de los problemas con que nos hemos enfrentado es el hecho de que las condiciones de cultivo en cada caso son muy diferentes y difícilmente comparables, lo cual es consecuencia en parte de la complejidad del cultivo de micro algas y en parte del objetivo en el que estaba enfocado cada estudio, hecho que aumenta considerablemente las variables a considerar en cada caso.

Decidir cuál de las mediciones es la más adecuada para realizar nuestros cálculos, resulta muy difícil por varios motivos, entre los cuales se pueden detallar los siguientes: ninguno de estos estudios corresponde a una ciudad ubicada en altura, la mayoría de los experimentos que utilizan luz natural están realizados en latitudes subtropicales que tienen un régimen luminoso y un régimen de temperaturas muy diferente a las zonas ubicadas entre los trópicos, aparte de todo esto, muchos de los estudios se

realizaron en condiciones de laboratorio que difícilmente se pueden comparar con las condiciones naturales.

Aún así, se asume que los resultados obtenidos por estos experimentos nos pueden dar datos de producción de O_2 lo suficientemente acertados para realizar nuestros cálculos con un margen de error relativamente pequeño, para lo cual analizaremos algunas variables que se consideran importantes.

En lo que se refiere a la latitud del lugar del experimento, en la siguiente figura, basada en el modelo matemático propuesto por (Grobbelaar et al., 1988), se puede observar que las latitudes del 0° a 20° son las que en teoría tienen una producción mucho más alta y más constante durante todos los meses del año, mientras que las que están por encima de los 20° tienen cada vez menos producción de O_2 durante los meses de invierno, este hecho está relacionado con la cantidad de horas luz y la variación estacional de las diferentes latitudes.

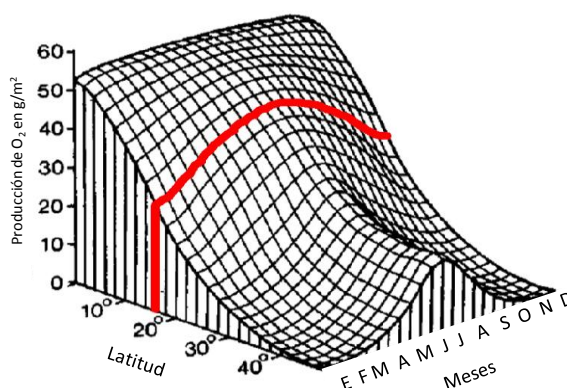


Ilustración 64.- Producción promedio de O_2 en relación con la latitud y la variación estacional para cultivos operados con una densidad aproximada de $40g/m^2$ (Pesado en seco), según lo estimado en modelo matemático, (Grobbelaar et al., 1988)

En las próximas imágenes realizadas como resultado de una investigación en diferentes latitudes se puede observar que efectivamente la ubicación tiene una importancia relevante en cuanto a lograr una producción de biomasa más equilibrada durante todo el año, pero se observa que la producción real no es tan alta como se predice en el modelo matemático y que en épocas de verano lugares ubicados al norte logran picos muy altos de productividad provocados por la mayor cantidad de horas de luz durante esos períodos.³⁶

³⁶ Si bien estas imágenes están relacionadas con la producción de biomasa, se han tomado en cuenta para ilustrar la producción de O_2 dado que ambas son directamente proporcionales.

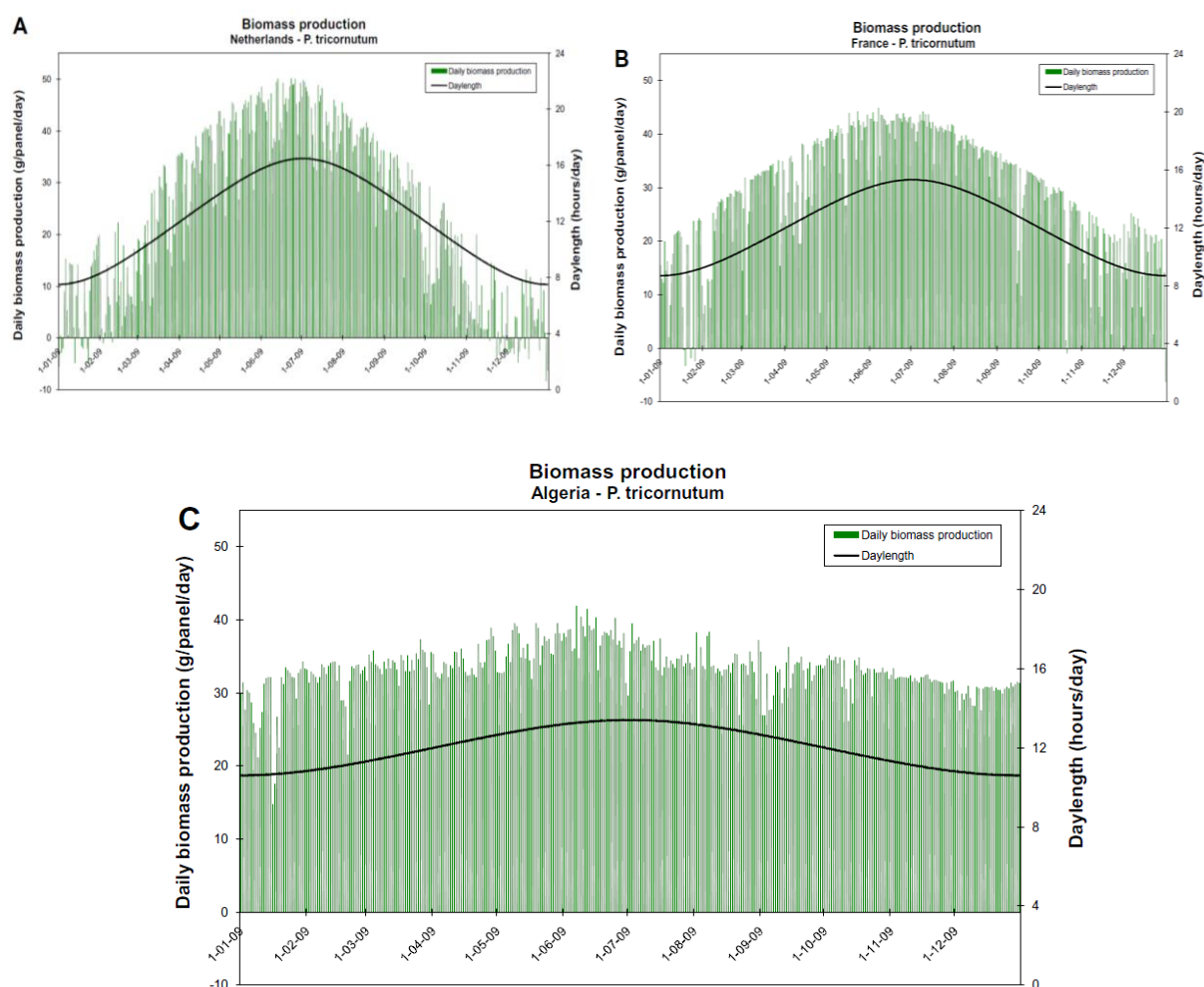


Ilustración 65.- Producción diaria de biomasa por un período de un año y *P. Tricornutum*. De arriba abajo: Página anterior: A.- latitud correspondiente a Holanda, B.- Francia y C.- Alergia. El eje vertical izquierdo representa la producción de biomasa, el derecho la longitud del día en horas. (Slegers et al., 2011)

En lo que se refiere a la temperatura, varios estudios aseguran que una buena producción de microalgas está relacionada con una temperatura promedio de 25°C, siendo éste uno de los parámetros fijos en sus experimentos (Steller et al., 2007) (Baliga & Powers, 2010) (Dhiab et al., 2007).³⁷

Por otro lado, se asegura que mantener la temperatura relativamente baja durante la noche puede reducir la respiración de las microalgas reduciendo de ésta forma la pérdida de biomasa y de oxígeno (Chisti, 2007). Esto puede ser de utilidad para los lugares de montaña, especialmente en la Ciudad de La Paz, donde la oscilación de temperaturas entre el día y la noche suele ser muy alta, por la acción del aire frío.

³⁷ Al igual que el diámetro de los fotobiorreactores, este es un dato de laboratorio y es dado para lograr los mejores resultados de un cultivo. En la realidad, se logran cultivos adecuados a temperaturas mucho más altas durante las horas de sol intenso y que luego vuelven a niveles más bajos.

En lo que se refiere a la radiación, se sabe que la producción de biomasa y por lo tanto de O_2 se puede ver afectada por la intensidad de la luz ya que cuando reciben una radiación excesiva los microorganismos se saturan de luz y minimizan su actividad. En zonas de alta montaña esto puede ser un problema bastante importante pues se sabe que a mayor altitud, mayor radiación.

Este fenómeno, se representa por una constante de saturación que es la intensidad de luz donde un cultivo específico desarrolla solo la mitad de su máxima capacidad productiva. (Ver ilustración 66).

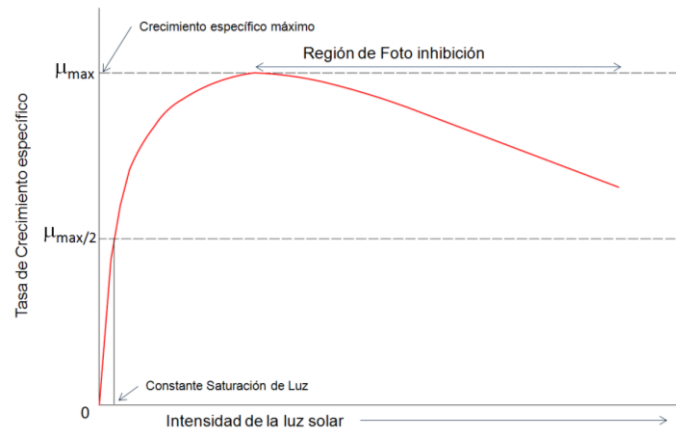


Ilustración 66.- Constante de Saturación de luz en relación a la Intensidad de la luz solar y la tasa de crecimiento específica (Chisti, 2007)

Es importante notar que pasado cierto punto de intensidad solar, la producción de biomasa decrece considerablemente debido a que las microalgas entran en un estado, llamado fotoinhibición, durante el cual respiran y consumen O_2 . Esto puede ser uno de los problemas más importantes a enfrentar en un cultivo en zonas de altura ya que la radiación se incrementa de manera directamente proporcional con la altitud, se calcula que por cada mil metros adicionales de altura, la radiación aumenta alrededor de un 10%, por otra parte se conoce que la cercanía al Ecuador también es otro factor que incrementa la radiación solar. Otro factor a considerar es que cuando coinciden una alta radiación con una cantidad exagerada de O_2 dentro del cultivo, se puede llegar a dañar e incluso matar el cultivo. (Chisti, 2007)

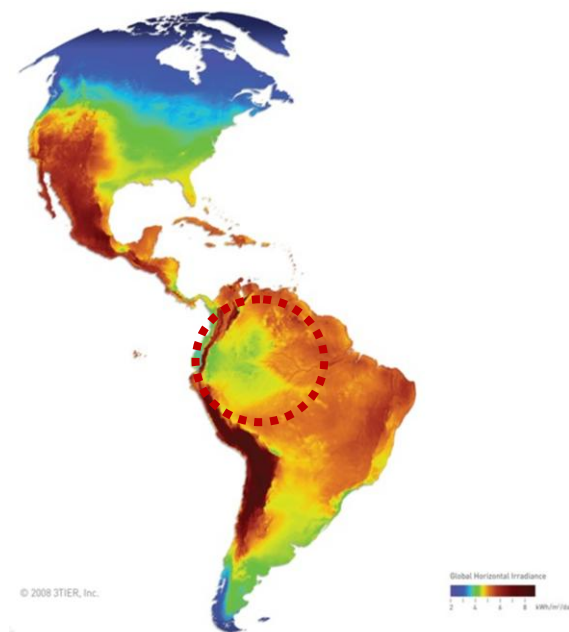


Ilustración 67.- Imagen de la radiación solar Superior Inferior: Hemisferio occidental <http://www.iluminasol.com/>

En la anterior imagen se ve que la radiación correspondiente a México y la zona Andina de Sur América donde está ubicada la ciudad de La Paz y otras varias ciudades ubicadas en altura, es muy intensa, por lo que en dichas zonas se tendrá un especial cuidado respecto a la radiación solar.

Además, se debe tomar en cuenta que a medida que la densidad de la biomasa aumenta, la producción puede disminuir porque hay partes del cultivo que dejan de recibir luz, por lo que la concentración de la biomasa debe ser considerada como uno de los factores que determinará la producción a gran escala.

Otras de las variables que se deben considerar es la especie a cultivar, dado que se trata de seres vivos, es necesario tomar en cuenta las características, necesidades y particularidades de cada una, además de tener cuidado de trabajar con especies autóctonas o perfectamente adaptadas al medio en el que se utilizarán para lograr los mejores resultados posibles.

Como se puede observar, del análisis de las diferentes investigaciones podemos concluir que dada la cantidad de variables que se manejan en cada caso, es necesario hacer estudios específicos en el lugar donde se realizará el cultivo con las especies adaptadas al medio y en las condiciones de radiación, ciclos de luz/oscuridad, temperatura, etc. característicos del mismo.

Por lo expuesto, con el objeto de hacer los cálculos necesarios, asumiremos los resultados de una de las investigaciones intentando la mayor cantidad de coincidencias con las condiciones del lugar donde se realizará el ejercicio.

Ejemplo 3.- Cálculo del volumen de cultivo (para el caso del ejemplo 2)

Con el objetivo de calcular la cantidad de cultivo que produzca el oxígeno necesario para enriquecer un ambiente específico, seguiremos con los ejemplos 1 y 2 del apartado anterior y tomaremos la ciudad de Toluca como sede de un pequeño ejercicio:

Sabemos que para el ejercicio anterior se necesitaría una cantidad de 14.08 m^3 de O_2 para un periodo de 8 horas, lo que equivale a 1.76 m^3 de O_2 , por hora o 1760 litros/h.

Para poder calcular el volumen del fotobiorreactor que necesitamos construir es necesario asumir una producción de O_2 biogénico, digamos que tomamos una producción promedio del experimento realizado por (Shuler & Affens, 1970), en el cual se calcula que para un período de una hora, en un cultivo con una concentración de biomasa de 5-10 g/L, es de 0.48 litros de O_2 por hora y Litro de cultivo.

Entonces:

$$VR = LO_2 / LPO_2$$

Donde:

VR=Volumen de Reactor (m^3) LO_2 =Litros de O_2 necesarios LPO_2 =Litros de O_2 Producidos

Entonces:

$$VR = 1760 / 0.048 = 3670 \text{ L} = 3.67 \text{ m}^3$$

Una vez determinado el volumen de cultivo que necesitamos es importante conocer la geometría del fotobiorreactor para definir en cuantas piezas o en que superficie se puede almacenar todo el cultivo necesario y determinar en proyecto o in situ la ubicación del mismo y todos los demás detalles.

En este caso podemos asumir que son biorreactores tubulares, los más comunes, de un diámetro de 12 cm³⁸. y una longitud total de 2 m. con un volumen interno de 0.02262 m³. Así que tenemos:

$$CR = 3.67 / 0.02262 = 2431.5 \text{ Piezas}$$

Donde CR= Cantidad de Biorreactores

7.4.- Caso de Estudio: Aplicación a una escuela en la ciudad de La Paz, Bolivia

Se propone la aplicación de este sistema a una escuela ya existente en la ciudad de La Paz, Bolivia con el objetivo de averiguar qué tan grande puede llegar a ser un sistema de este tipo y si es factible su montaje. Esto permite cierto grado de acercamiento a la realidad y la posibilidad de resolver la problemática planteada por la orientación existente, la colindancia y la distribución de espacios dentro de un terreno específico.

Los datos del ejercicio son los siguientes:

Lugar: La Paz, Bolivia - Población 1'565.000 habitantes

Altitud: 3650 msnm - Altitud Equivalente: 2800msnm - Porcentaje de O₂ a añadir: 3%

Tipo de edificación: Escuela Pública - Horario: 8:00 a 14:00

Áreas con aire enriquecido: 12 Aulas para 20 alumnos (40 m²c/u); Despacho Director (15 m²); Secretaría para 3 personas (20 m²); Sala de profesores con 15 personas (30 m²), Laboratorio Informática o Idiomas para 20 personas (65 m²).

Es importante aclarar que no todos los ambientes serán enriquecidos con oxígeno, se han excluido las instalaciones sanitarias así como los laboratorios de física y química, vestuarios de Educación Física, y las áreas de servicio.

A continuación se muestran las fotografías de la zona y un acercamiento a la escuela elegida:

³⁸ Se ha asumido un diámetro de tubo de 12 cm que es algo mayor a lo que plantea Chisti, (2008) que limita el diámetro de los tubos a 10 cm., esto porque se considera que en latitudes intertropicales, las condiciones de luz suelen ser más adecuadas que en las latitudes mayores a 30°.

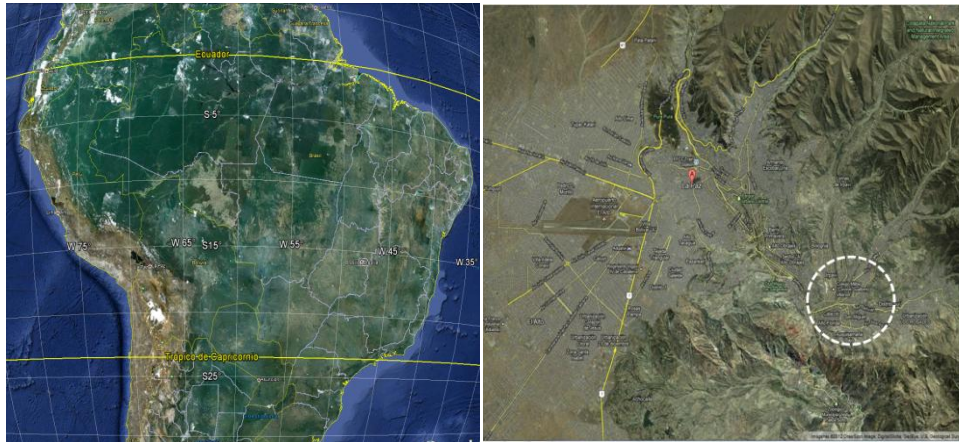


Ilustración 68.- Imágenes tomadas de de Google Earth, a la Izquierda, la ubicación de Bolivia y al a derecha, un acercamiento a la Ciudad de La Paz. (Imagen tomada de Google Earth)



Ilustración 69.- Vista del Terreno completo a detalle donde se pueden observar las edificaciones existentes. (Imagen tomada de Google Earth)

Todos los datos han sido introducidos al Excel donde se han realizado los diferentes cálculos, necesarios para determinar, por una parte, la cantidad de O_2 que se necesita por hora, (Ilustración 70 o Anexo 2.- Cuadro Cálculo de Volúmenes de O_2), y por otra, cuantos fotobiorreactores son necesarios para producir esa cantidad de O_2 , en el mismo tiempo. (Ilustración 71 o Anexo 3.- Cálculo de Superficies de Biorreactores para producir la cantidad de O_2 necesario)

Confort Respiratorio en Zonas de Altura - Enriquecer el aire con O ₂ Biogénico														
Cálculo de volúmenes de O ₂														
Ubicación:		La Paz, Bolivia												
Altitud (msnm)		3650												
Altitud Equivalente (m)		2750												
Diferencia (m)		900												
% de O ₂ a añadir		3%												
Área	Cantidad	Área	Altura	Volumen Espacio	Nº Pers.	de Nivel Act.	de Aire Exterior	Concentración Interior	Tasa ventilación zona	de Tasa ventilación espacio	de Total cambios hora	Vol. Total de aire a mover (m3/h)	Oxígeno a introducir (m³/h)	Oxígeno a introducir en 8 horas (m³)
Oficinas Director	1	15	2.5	37.5	1	0.022	0.0005	0.001	44	44	1.17	44	1.32	10.56
Secretaría	1	20	2.5	50	3	0.022	0.0005	0.001	44	132	2.64	132	3.96	31.68
Sala de profesores	1	30	2.5	75	15	0.022	0.0005	0.001	44	660	8.80	660	19.8	158.4
Aulas normales	12	40	2.5	100	20	0.022	0.0005	0.001	44	880	8.80	10560	316.8	2534.4
Laboratorio de Informática/Idiomas	1	65	2.5	162.5	20	0.022	0.0005	0.001	44	880	5.42	880	26.4	211.2
Totales				425									368.28	1841.4
Total Oxígeno a producir (m3/h)													368.28	
Total Oxígeno necesario (l/h)													368,280.00	

Ilustración 70.- Imagen de los cálculos realizados para obtener la cantidad de O₂ necesario para el enriquecimiento de la Escuela René Barrientos, en La Paz, Bolivia. (Elaboración propia)

Confort Respiratorio en Zonas de Altura - Enriquecer el aire con O ₂ Biogénico												
Calculo de superficies de Biorreactor para lograr la cantidad de O ₂ necesario												
Basado en: Shuler R. L. and Affens W. A. , Effect of Light Intensity and Thickness of Culture Solution on Oxygen Production by Algae							Reactor plano		Reactor tubular			
Tipo de alga	Intensidad luminica	Profundidad de la luz (cm)	Oxígeno Producido promedio Litros de O ₂ /h/L	O ₂ necesario (L/h)	Volumen reactor (m³)	de	Grosor del reactor	Superficie del reactor (m²)	Volumen Reactor tubular (m³)/pieza	Cantidad reactores tubulares	de	Concentración de Biomasa
Chlorella pyrenoidosa	de 20000 a 70000 pies candelas	2.9	0.32	368,280.00	1150.88		0.05	23,017.50	0.0226	50879.73		5-10g/L
Chlorella pyrenoidosa	de 20000 a 70000 pies candelas	2.6	0.35	368,280.00	1052.23		0.05	21,044.57	0.0226	46518.61		5-10g/L
Chlorella pyrenoidosa	de 20000 a 70000 pies candelas	2.2	0.48	368,280.00	767.25		0.06	12,787.50	0.0226	33919.82		5-10g/L
Chlorella pyrenoidosa	de 20000 a 70000 pies candelas	1.4	0.9	368,280.00	409.20		0.05	8,184.00	0.0226	18090.57		5-10g/L
Chlorella pyrenoidosa	de 20000 a 70000 pies candelas	1	1.3	368,280.00	283.29		0.05	5,665.85	0.0226	12524.24		5-10g/L
Basado en: Shuler R. L. and Affens W. A. , (1970) Effect of Light Intensity and Thickness of Culture Solution on Oxygen Production by Algae												

Ilustración 71.- Imagen de los cálculos realizados para obtener el volumen de fotobiorreactores necesario para obtener 368.28 m³ de O₂/hora. (Elaboración propia)

Como puede observarse en las ilustraciones 70 y 71, la cantidad de O₂ necesario para poder enriquecer todos los ambientes elegidos durante una hora asciende a 767.25 m³. Para poder producir en ese

período dicha cantidad tendríamos que tener una superficie de 12,787 m², en caso de fotobiorreactores planos o 33,919 fotobiorreactores tubulares de 0.12 m de diámetro y 2 m de largo cada uno.

Confort Respiratorio en zonas de altura, Enriquecer el aire con oxígeno biogénico						
Cálculo de Fotobiorreactores Escuela René Barrientos						
Nº	Ubicación del biorreactor	Cantidad de Biorreactores	Cantidad de Tubos en cada Biorreactor	Longitud del tubo	Radio de cilindro	TOTAL ml
1	Azotea	484	10	2		9,680.00
2	Adosado a muro en 2 niveles	50	44	1.75		3,850.00
3	Adosado a muro en 3 niveles	25	61	1.75		2,668.75
4	Cerca hacia el oeste	48	19	1.75		1,596.00
5	Cerca hacia el este y Fachada Sur	58	19	1.75		1,928.50
6	Parada de autobus	2	31	1.75		108.50
7	Cilindro 1	1	50		1.19	373.85
8	Cilindro 2	1	50		2.39	750.84
9	Cilindro 3	1	50		1.79	562.35
Total ml de biorreactor (ml)						21,518.79
Total volumen de cultivo (m³)						243.37

Ilustración 72.- Cálculo de volumen real instalado en la Escuela René Barrientos. (La Paz, Bolivia). Elaboración propia

Para la ubicación de los fotobiorreactores en la escuela se han utilizado todas las superficies verticales en las que se pueden adosar fácilmente y se han tomado en cuenta los muros de cerco, asumiendo que la propia estructura del fotobiorreactor puede hacer a la vez de cerco perimetral de la escuela.

Por otra parte, se han colocado fotobiorreactores modulares en las losas superiores orientados en el eje norte - sur y a una distancia de 1 m entre ellos, para permitir mejores niveles de luz y sombra, además de permitir el mantenimiento de los mismos. Todos los fotobiorreactores se han colocado verticalmente para evitar la radiación directa sobre los tubos y el sobrecalentamiento del cultivo.

Como propuesta adicional, se han colocado 3 fotobiorreactores cilíndricos en el patio de la escuela y en el exterior de la misma 2 estructuras de fotobiorreactores que sirven, además como mobiliario urbano.

A pesar de haber cubierto una gran cantidad de superficies con fotobiorreactores, se ha logrado un volumen total de cultivo de 243.37 m³, es decir aproximadamente un tercio de lo que se necesitaría para cubrir las necesidades de oxígeno de la escuela.

Es importante indicar que este gran volumen de cultivo se debe a que la cantidad de O₂ necesario está determinado por los cambios de aire de cada espacio en su momento de mayor uso y que deben ser

enriquecidos con O_2 constantemente para garantizar la renovación del aire en cada ambiente durante una hora.

Considerando que durante todas las horas que haya luz, las algas producirán oxígeno, el oxígeno adicional debe ser almacenado en condiciones óptimas para su uso posterior, una alternativa sería prever depósitos de oxígeno lo suficientemente grandes como para retener un volumen del el doble o el triple de la cantidad de oxígeno que las microalgas producen en una hora y de esta forma asegurar el oxígeno necesario para la escuela durante el horario efectivo de uso de la misma.

En las ilustraciones 73, 74 y 75 se pueden apreciar varias imágenes de los diferentes fotobiorreactores diseñados para la presente propuesta. En el caso de los cilindros, se puede observar que el depósito de oxígeno estaría en el centro de los mismos.

Un elemento importante a considerar es que un sistema de estas características tendría necesariamente que ser implementado a nivel urbano y en todas las edificaciones posibles de tal manera que todos los espacios cerrados, o al menos la mayoría de ellos, cuente con enriquecimiento de aire y toda la población se vea beneficiada con un aire enriquecido.

Si además de proveer de O_2 biogénico a todos los espacios construidos, se produce la biomasa necesaria para la elaboración de alimentos o de biocarburantes que puedan dotar de energía a las mismas instalaciones, el cultivo podría estar totalmente justificado y su implementación a nivel urbano podría significar que las ciudades fueran capaces de reciclar completamente el agua que desechan y el aire que utilizan de manera inmediata.



Ilustración 73.- Vistas aéreas de la Escuela René Barrientos con los fotobiorreactores, (elaboración propia).

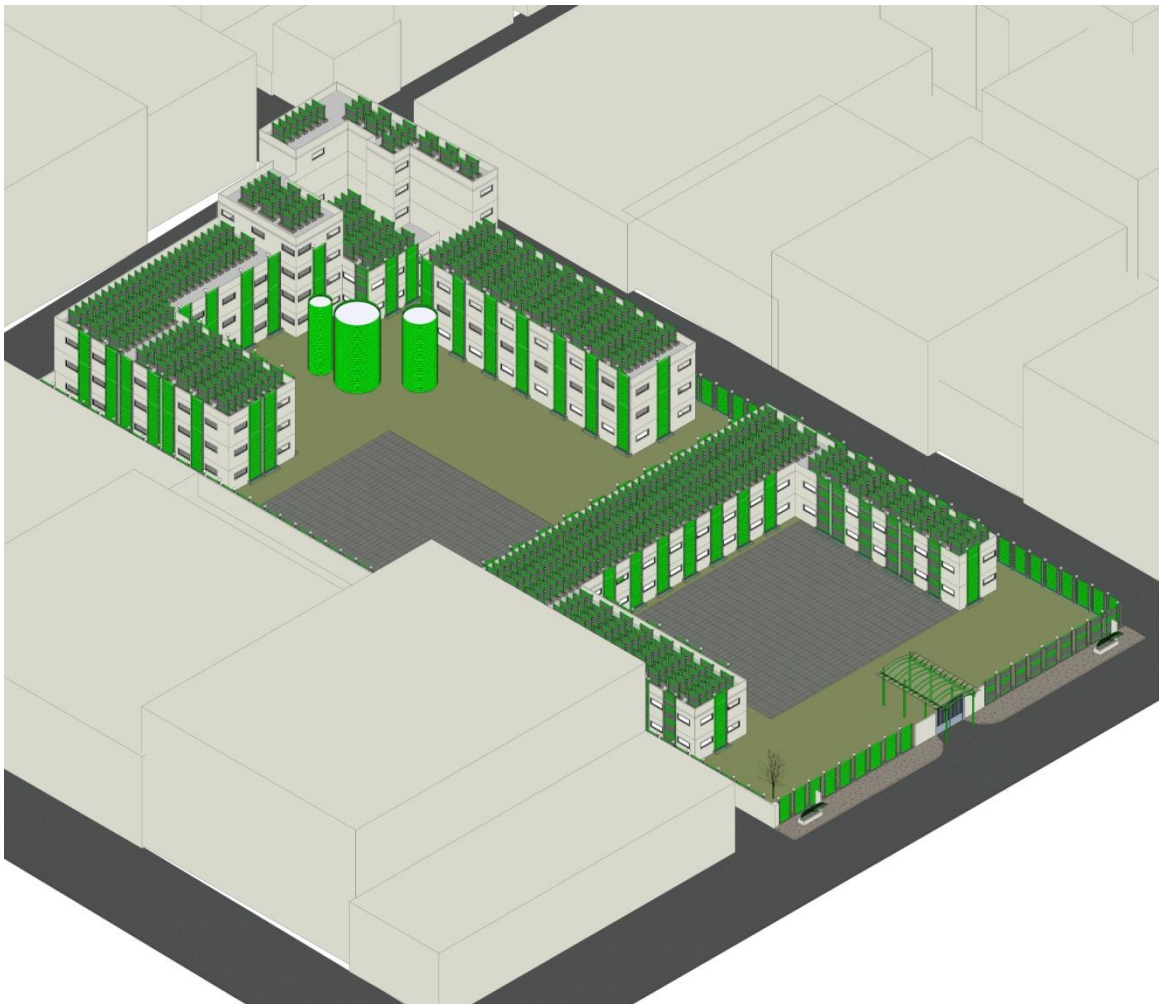


Ilustración 74.- Imágenes de los fotobiorreactores colocados en la Escuela René Barrientos, se propone darles, además, la función de muro de cero o mobiliario urbano. (Elaboración propia)



Ilustración 75.- Detalle de Fotobioreactores que pueden cumplir varias funciones o estar adosados a una infraestructura existente. (Elaboración propia)

7.5.- Enriquecer el aire con O₂ obtenido de la atmósfera

Dado que el oxígeno se puede extraer relativamente fácil de la atmósfera (West, 1995), los cálculos realizados en la primera parte del ejercicio, que están relacionados con la cantidad de O₂ necesario en un espacio, nos permiten conocer las dosificaciones para cada caso de enriquecimiento del aire con otras fuentes de oxígeno.

Por lo tanto, los cálculos del primer cuadro referentes al enriquecimiento del aire interior son totalmente válidos y queda claro que dicho enriquecimiento redundaría en el beneficio de la población de zonas de gran altura, por lo que esta parte del programa puede ser tomada en cuenta para mejorar la calidad de aire de estas poblaciones con instrumentos adecuados a cada caso.

Por ejemplo, uno de los instrumentos que pueden ser de utilidad, son los concentradores de oxígeno eléctricos a los que se les puede añadir un dosificador especial, de tal manera que se pueda controlar la cantidad de O₂ que se está cediendo al espacio interior. Sin embargo estos suelen ser para volúmenes relativamente pequeños de aire y no para grandes volúmenes de aire que constantemente se tienen que estar renovando.

En este caso, es muy importante tomar en cuenta las recomendaciones de lograr un espacio lo más estanco³⁹ posible para evitar la pérdida de este gas y también el hecho de que los ambientes enriquecidos con O₂ deben ser espacios en los que no se fume ni se realice actividades que incluyan combustión de algún tipo ya que el oxígeno puede incrementar el riesgo de incendio aunque, si se respetan los porcentajes sugeridos, el riesgo es mínimo.

7.6.- Alternativas de uso del sistema

Dado que en última instancia, la justificación de un sistema tan complejo como el propuesto para la escuela en La Paz, Bolivia depende del objetivo final del mismo, a continuación se dan las diferentes opciones en las que puede ser totalmente aprovechado.

7.6.1 Mejorar la calidad de aire en interiores

Se ha visto que los volúmenes de cultivo de microalgas para el enriquecimiento de aire hacia el interior de las edificaciones son demasiado grandes, sin embargo existe la posibilidad de aprovechar la capacidad fotosintética de las microalgas para mejorar la calidad del aire que respiramos sin necesidad de enriquecerlo en porcentajes tan altos.

³⁹ Se refiere a un espacio en el que se han controlado las fugas de aire. En general esto se soluciona sellando la unión de diferentes elementos constructivos, por ejemplo las juntas entre ventanas y muros o la colocación de burletes en la parte inferior de las puertas y sobre todo previendo esclusas en los accesos de la habitación.

Si se recircula el aire enviciado de las habitaciones ocupadas inyectándolo en el cultivo de microalgas y se renueva el aire de las mismas con aire limpio filtrado por dicho cultivo, se puede lograr, por una parte, que las algas se nutran con el CO₂ que produce el ser humano, y por otra, que los ambientes interiores tengan un aire constantemente limpio, renovado con oxígeno y sin contaminantes.

Esta solución implicaría que la ventilación de los ambientes tendría que estar ligada a la ventilación del sistema de microalgas, lo cual aseguraría una renovación constante del aire que respiramos de forma inmediata. El aire enviciado de las habitaciones sería solo una de las fuentes de nutrición para las algas ya que estas podrían nutrirse adicionalmente con el CO₂ de la atmósfera exterior.

En este caso, el volumen del cultivo estaría determinado por la cantidad de biomasa que se quisiera lograr y la especie de las microalgas por el producto final deseado, mismo que puede ser utilizado para la elaboración de biocombustible, como nutriente, como materia prima para la medicina o por las ventajas medioambientales que ciertas especies de microalgas presentan para la fitoremediación del ambiente, este último caso puede ser utilizado en las zonas de alta contaminación atmosférica como por ejemplo Cerro de Pasco, en Perú que además de ser una de las ciudades más altas del mundo presenta altos niveles de contaminación en el aire por la explotación minera ubicada en dicha ciudad.

Esta alternativa mejoraría significativamente la calidad de aire no solo en zonas de altura sino también en ciudades donde la contaminación es muy alta y donde los niveles de CO₂ en la atmósfera representan, muchas veces, más del doble de la cantidad habitual de este gas. Los habitantes de las grandes ciudades del mundo podrían verse significativamente beneficiados por este sistema y en un plazo mayor podría significar la eliminación total de dicho gas de la atmósfera, lo que ayudaría a reducir el efecto invernadero y el calentamiento global.

Los grandes edificios de las metrópolis pueden significar una estructura ideal para el cultivo de las microalgas y más allá de tener un aire limpio, las ciudades podrían beneficiarse de contar con una fuente renovable de energía o de nutrientes, eliminando la huella ecológica de alto impacto que actualmente significa la explotación y el transporte del petróleo.

7.6.2 Capturar el CO₂ industrial

El sistema propuesto es interesante para aquellos casos en los que el objetivo principal sea el aprovechamiento de todas las ventajas que podemos lograr a través del cultivo de microalgas, es decir la obtención de grandes cantidades de biomasa algal para convertirla ya sea en alimentos, combustibles o en otro producto de uso a gran escala.

Resulta aún más interesante en los casos en los que, además de la producción de biomasa, se reciclan el agua o el CO₂ para la nutrición del cultivo, con el objetivo de mitigar los residuos nocivos hacia el medio ambiente, en este caso, el aprovechamiento del O₂ biogénico, producto residual del sistema, sería simplemente una ganancia adicional del mismo para mejorar la calidad de aire en espacios cercanos a la planta industrial.

Una posibilidad sería ubicar este sistema de fotobiorreactores en zonas altas y áridas, aunque con suficiente agua, que tengan relación directa con alguna industria que produzca suficiente CO₂ para que se pueda nutrir con este al cultivo.

Un ejemplo de esto podría ser la fábrica de cemento SOBOCE, ubicada en la zona de Viacha (3.876 msnm, Departamento de La Paz, Bolivia), en la cual se podría utilizar todo el CO₂, que actualmente libera hacia la atmósfera, para la nutrición del cultivo.

La biomasa sería la materia prima para la elaboración de biocombustibles y fuente de energía para la misma planta de producción de cemento. La utilización del CO₂ ayudaría a mitigar la contaminación de la atmósfera que afecta a la población cercana, la misma que ha crecido en relación con la mencionada industria.

Por otra parte, se podría utilizar el calor de los hornos de la cementera para el secado de la biomasa y el O₂ producido por las microalgas serviría para mejorar la calidad de aire de las oficinas de SOBOCE que, en este caso, es posible que pueda proveer de cierto porcentaje de oxígeno adicional y aunque no llegue a un 3%, pueda significar una mejoría en la calidad de vida de los trabajadores.

La infraestructura de la cementera podría ser utilizada como base para colocar los fotobiorreactores, por ejemplo, en las fachadas, cubiertas, losas, muros de cerco, etc. y, en caso de ser necesario, se podrían utilizar los terrenos cercanos a la fábrica, que no son aptos para

otras actividades como la agricultura, para ampliar el cultivo de microalgas y lograr una independencia energética total, además de las ventajas ya detalladas.

En este caso, o en otros similares, el sistema sería no solamente factible sino que podría redundar en beneficios para la población de los asentamientos cercanos a la industria aunque habría que verificar que se den todas las condiciones necesarias como ser un flujo de agua y nutrientes suficiente para implementar el sistema.

A continuación se muestran algunas imágenes de la fábrica de cemento SOBOCE, que ha servido como ejemplo para utilizar el sistema propuesto de cultivo de microalgas y mejorar la calidad de aire en zonas contaminadas y, en este caso, ubicadas en altura.

En dichas imágenes se muestra claramente no solo el deterioro del ambiente producido por la industria cementera, pero además la gran escasez de vegetación típica de las zonas altas con la consecuente carencia de alimentos para la población y que es posible mitigar con el cultivo propuesto de microalgas.



Ilustración 76.- Imagen tomada de Google Earth de la Viacha, población desarrollada en base a la Fábrica de Cemento ubicada al Noroeste de la población. (Imagen tomada de Google Earth)

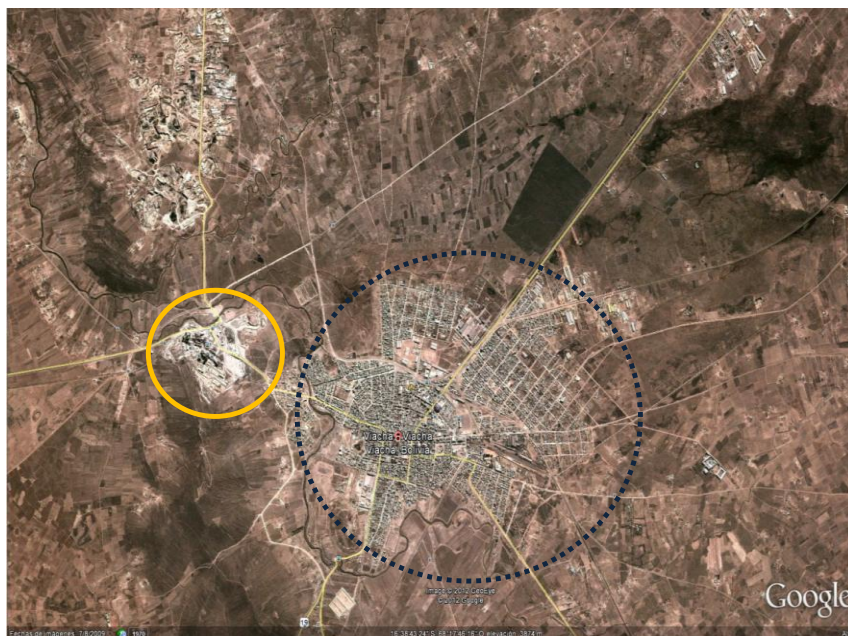


Ilustración 77.- Detalle de la Fábrica de Cemento SOBOCE (Viacha, Departamento de La Paz, Bolivia) (Imagen tomada de Google Earth)

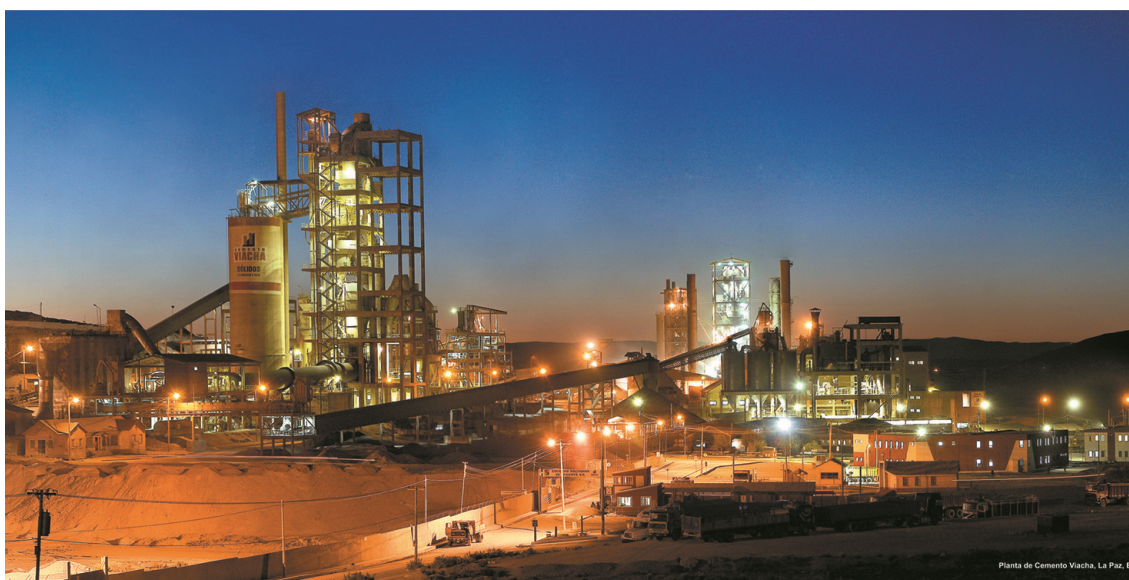


Ilustración 78.- Imagen nocturna de la Planta de Cemento Viacha. (SOBOCE)

Capítulo 8

8.- Discusión

Más allá de los objetivos económicos y energéticos que se puedan derivar del uso de las microalgas, una de las mayores ventajas que representa el cultivo de éstas es la posibilidad de remediar el daño medioambiental producido por la acción del ser humano y la sobre población. En este sentido, la investigación relacionada con el cultivo de microalgas se ha concentrado básicamente en la remediación de las fuentes naturales de agua y el pre tratamiento de las aguas residuales tanto residenciales como industriales, (Salazar, 2006) (Grobbelaar et al., 1988), también se investiga mucho sobre cómo reducir el gran exceso de CO₂ en la atmósfera a través del cultivo de microalgas, siendo que estas consumen este gas como nutriente.

Actualmente el cultivo de microalgas está revolucionando varias áreas de conocimiento y la arquitectura es una de ellas, se sabe que las microalgas podrían marcar una diferencia en la historia de la ecología urbana y la posibilidad de que los arquitectos se involucren en este proyecto puede ser la articulación que determine el logro de esta tecnología a nivel urbano dando como resultado ciudades y edificios amigables con el medio ambiente.

Últimamente se han dado algunas iniciativas en este sentido y una prueba de esto son los concursos internacionales de ideas que incluyen el diseño arquitectónico con microalgas promocionados por Robert Henrikson and Mark Edwards. En estos concursos se han desarrollado ideas en las que se incluyen el cultivo de microalgas en el paisaje urbano, como fotobiorreactores que capturan el CO₂ de la atmósfera para nutrir a las microalgas, parques flotantes que depuran las playas contaminadas, y nuevas estructuras autosustentables basadas en el cultivo de microalgas tanto para la depuración de aguas grises como para la elaboración de fuentes de energía, así como propuestas similares para edificios ya existentes y diseños de parques infantiles o mobiliario urbano. (Henrikson & Edwards, 2012)

A continuación se muestran una serie de imágenes concurso mencionado en las cuales se muestran las diversas propuestas arquitectónicas y urbanísticas presentadas como respuesta a la problemática medioambiental y la sobrepoblación.



Biorreactores Parasitarios Concebidos como estructuras desarrolladas a lo largo de las infraestructuras viales urbanas y capaces de capturar la materia prima que las microalgas necesitan para su desarrollo. Por Manuel Hernández.



AsterioFuel Propuesta de estaciones de servicio de biocombustible algal en Barcelona España, por Ignacio Montojo



CDEFG-Park Parque flotante verde, eliminador de bióxido de carbono. Propuesta de Adrian Yee Cheung Lo



Green Miles, una autopista entre la gasolina y los biocarburantes propuesta para la captura de CO₂ y la transición hacia los biocarburantes de Kathryn Hier



Restaurar: Simbiosis al interior de una comunidad, Depuración de agua y aire a través de cultivo de microalgas en sombrillas. Propuesto por ArquitectonicaGEO.



Lazo Verde, una propuesta de Influx-Studio que propone un modelo de cultivo urbano de microalgas utilizando la estructura de un ícono arquitectónico en Chigago, las torres de Marina City.



PAM Centre, propuesto por Parsuatna Arkitekt Malaysia, en el que toda la piel del edificio está formada por biorreactores.



Hydral Complejo de viviendas con fotobiorreactores en las fachadas en las que se propone producir hidrógeno. Propuesto por Thomas Kosbau



Parque de Exposiciones Se propone que toda la energía del complejo sea obtenida de la biomasa algal. Propuesta de Chen Jie.

Ilustración 79.- Imágenes tomadas de la página <http://www.algaecompetition.com/algae-slideshows/algae-architecture>; del concurso propuesto por (Henrikson & Edwards, 2012).

No cabe duda que aún hay mucho por investigar y muchos detalles importantes por resolver para lograr que estas iniciativas se hagan realidad, el cultivo urbano de las microalgas es un tema más del futuro que del presente, pero la única manera de hacerlo realidad es enfrentarlo y resolverlo en el presente para construirlo en el futuro.

Es posible que la solución al confort respiratorio en las zonas de altura también se encuentre en algún lugar del futuro y que esté relacionada, por el volumen que requiere, más con el urbanismo que con soluciones arquitectónicas puntuales.

De cualquier forma, es momento de que la arquitectura retome una relación amigable con el medio ambiente y de un giro hacia la solución de los problemas ambientales en vez de suponer una carga cada vez más pesada para el planeta. De nosotros los arquitectos depende en gran medida si la humanidad va a seguir siendo un problema o, retomando su objetivo inicial, se va a reconvertir en una solución.

Capítulo 9

9.- Conclusiones

A lo largo del presente trabajo, se ha visto como el ser humano se ve afectado por la vida en altura y cómo, si bien llega a climatizarse y a llevar una vida totalmente normal, suele tener que enfrentar ciertos inconvenientes que personas que viven en zonas más bajas no los tienen. Se ha visto que aunque el habitante de zonas altas no sufra ninguna patología específica, la altitud afecta a la vida diaria, un ejemplo de esto es la poca resistencia a la práctica de deportes y en general a la actividad física.

A lo largo del trabajo, se ha comprobado que la razón de los desequilibrios que una persona puede sufrir en la altitud están, en su mayoría, relacionados con la falta de oxígeno en el aire. La investigación realizada demuestra que es factible e incluso deseable aumentar la presión de O_2 en el interior de las edificaciones y se ha visto que médicos especializados aseguran que un enriquecimiento con pequeños porcentajes de oxígeno puede mejorar considerablemente el bienestar de las personas en zonas de altura e incluso la salud de personas ya afectadas con alguna enfermedad de montaña.

La altitud afecta a todos los seres vivos y por tanto también a las plantas, es conocido que en las zonas altas hay una gran escasez de cultivos y los que hay se reducen a una gran variedad de tubérculos y algunos cereales, por lo que las fuentes nutricionales y energéticas son bastante limitadas.

Teniendo en cuenta esto y el hecho de que la población de las zonas altas está en crecimiento, es probable que la carencia de alimentos sea uno de los problemas más graves que estas zonas tengan que enfrentar en un futuro cercano por lo que se propone un sistema, en el cual, además de producir oxígeno biogénico, se pueda coadyuvar a la solución de problemas nutricionales y/o energéticos a través del cultivo de microalgas, las mismas que además proporcionan soluciones medioambientales tales como la depuración de las aguas grises y la captura de CO_2 de la atmósfera o de áreas industriales.

En lo que respecta a utilizar el oxígeno biogénico para el enriquecimiento del aire interior en zonas de altura no se han logrado resultados definitivos. El sistema está basado en la naturaleza, por lo tanto funciona, pero lo hace, en gran proporción, en la inmensidad de los océanos que representan aproximadamente el 60% de la superficie terrestre, sin contar con los ríos y lagos del mundo o la vegetación terrestre.

Tomando en cuenta los experimentos realizados en laboratorio y asumiendo los resultados de éstos para realizar el cálculo de producción de oxígeno biogénico, por parte de microalgas, se ha visto que para atender un requerimiento de solo el 3% de oxígeno adicional en la ventilación de los espacios, el volumen necesario de cultivo es exageradamente alto. Se concluye que, en el caso de estudio, el problema del sistema está relacionado con el volumen del mismo, por lo que es posible que la solución sea implementarlo a gran escala y no puntualmente.

También es posible que un sistema de ventilación en el que se recicle todo el aire a través de los cultivos de microalgas pueda ser más eficiente que el plantear exclusivamente la recuperación de O_2 para enriquecimiento del aire, esto podría ser beneficioso no solo por que las personas estarían recibiendo de retorno un aire totalmente limpio y seguramente algo más oxigenado, sino también porque el CO_2 producido por la respiración y otros agentes, sería inmediatamente capturado.

Más allá de la calidad de aire, la investigación realizada pone en evidencia algo que es muy importante y es el hecho de que los espacios urbanos se pueden beneficiar ampliamente con el cultivo de microalgas ya que estas ofrecen un abanico muy diverso de productos y soluciones para el ser humano.

En cuanto a las soluciones hemos visto que las microalgas pueden coadyuvar a mitigar en formas muy eficaces la contaminación medioambiental y sería necesario empezar a tomar medidas que estén enfocadas a lograrlo. Una de las maneras de hacerlo puede ser aprovechando la capacidad de éstas de nutrirse de los desechos orgánicos e inorgánicos del agua y la capacidad de nutrirse del CO_2 que cedemos a la atmósfera en la combustión ya sea del parque automovilístico o de la actividad industrial.

En cuanto a los productos que ofrecen estos son tan diversos que abarcan desde alimentos, tanto para seres humano como para animales, hasta energéticos, pasando por la medicina, la cosmética, la producción de fertilizantes y la producción de plásticos biodegradables.

Desde cualquier perspectiva que se analice, el cultivo de microalgas es beneficioso para el ser humano, la posibilidad de hacerlo dentro de la estructura urbana, donde la problemática medioambiental se agudiza, abre una perspectiva totalmente nueva e innovadora para urbanistas, arquitectos e ingenieros que tienen que enfrentar el reto de crear edificios vivos, en los que los subproductos no sean un problema sino parte de la solución.

La arquitectura y el urbanismo son artes vivas y van cambiando en la medida que cambian las necesidades y las características de la sociedad en que vivimos. Destinados a dar soluciones, es importante que los arquitectos retomemos la responsabilidad de ofrecerlas desde un profundo compromiso con el medio ambiente y utilicemos la posibilidad que el cultivo de microalgas implica como solución no a uno, sino a casi todos los problemas que la humanidad enfrenta actualmente, enfocando la atención de tal manera que el desarrollo urbano implique dar soluciones en vez de plantear problemas.

Bibliografía

Bibliografía Referenciada

Abbeyes, H.d. et al., 1989. *Botanica, vegetales inferiores*. Segunda Edición ed. Sant Joan Despí (Barcelona): Editorial Reverté.

Acosta, J.d., 1590. *Historia Natural y Moral de las Indias*. Madrid: Hispali.

Álvarez, J.A.E.G., 2004. *Así Funciona, Ciencia y Tecnología al alcance de todos*. [Online] José Antonio E. García Álvarez Available at: http://www.asifunciona.com/tablas/intensidad_sonidos/intensidad_sonidos.htm [Accessed 4 de Enero de 2012 Enero 2012].

Amos, R.(.p., 2004. *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and Applied phycology*. Primera ed. Oxford, UK: Blackwell Publishing, Science.

Asimov, I., 1968. *Fotosíntesis, La clave energética*. 1994th ed. Barcelona: RBA Editores, S.A.

Asimov, I., 1973. *Introducción a la Ciencia II, Ciencias Biológicas*. Madrid: Plaza & Janes Editores.

Baliga, R. & Powers, S.E., 2010. Sustainable algae Biodiesel Production in cold climates. *International Journal of Chemical Engineering*, Volume 2010(doi:10.1155/2010/102179), pp.Article ID 102179, 13 pages.

Britannica, E., 2006. *Human Respiration*. [Online] Available at: <http://www.britannica.com/EBchecked/media/99770/The-diaphragm-contracts-and-relaxes-forcing-air-in-and-out> [Accessed 11 Mayo 2012].

Britannica, E., 2012. *Northern Lights*. [Online] Available at: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/419772/northernlights> [Accessed 20 Octubre 2012].

Cabrera, M.V., 2005. *Organización Panamericana de la Salud*. [Online] © Copyright Organización Panamericana de la Salud Available at: <http://www.ops.org.bo/altura/doc1.htm> [Accessed 24 Julio 2011].

Cerón, H.G., 2011. *Temas selectos de biología*. [Online] Available at: <http://tsbbenitobios.blogspot.com/2011/02/aparato-respiratorio.html> [Accessed 2 Marzo 2012].

Chisti, Y., 2007. Biodiesel by microalgae. *Biotechnology Advances*, 25, p.294–306.

Chisti, Y., 2008. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology - Opinion*, Vol.26 (No.3), pp.126 - 131.

Cortés Gabaudan, F. & Ureña Bracero, J., 2011. *Dicciomed.eusal.es. Diccionario médico-biológico, histórico y etimológico*. [Online] Available at: <http://dicciomed.eusal.es> [Accessed 7 Enero 2012].

Cubas, P., 2008. *Aulados.net*. [Online] Available at: www.aulados.net [Accessed 2011 Noviembre 2011].

Dery, B., 2005, 2011. *El Diccionario visual*. [Online] Available at: http://www.infovisual.info/01/022_es.html [Accessed 12 Enero 2012].

Dhiab, R.B. et al., 2007. Growth, fluorescence, photosynthetic O₂ production and pigment content of salt adapted cultures of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. *J Appl Phycol*, 19, p.293–301.

Frontczak, M. & Wargocki, P., 2011. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46, pp.922 - 937.

Fuentes Freixanet, V.A., 2010. Confort. In (ANES), A.N.d.E.S., ed. *Arquitectura Bioclimática - Notas del curso de actualización*. Guanajuato, México, 2010.

Fuentes, V.A. & Rodríguez, M., 2004. *Ventilación Natural, Cálculos Básicos para Arquitectura*. México, D.F.: universidad Autónoma Metropolitana - AZC.

González, G.F. & Tapia, V., 2007. Hemoglobina, Hematocrito y adaptación a la Altura: su relación con los cambios hormonales y el periodo de residencia multigeneracional. *Revista Med, Redalyc*, 15(001), pp.80 -93.

GreenFacts, 2001 -2011. *GreenFacts*. [Online] Available at: copublications.greenfacts.org/es/lamparas-bajo-consumo/index.htm [Accessed 6 Enero 2012].

Grobbelaar, J.U. et al., 1988. Rates Of Biogenic Oxygen Production In Mass Cultures Of Microalgae Absorption Of Atmospheric Oxygen And Oxygen Availability for waste water treatment. *Waf. Res.*, Vol. 22(No. 11), pp.1459-64.

Han, N., 2010. *123 RF*. [Online] Available at: http://es.123rf.com/photo_8958167_costa-rocosa-lleno-de-algas-verdes-largo-tiempo-de-exposici-n-taiw-n-de-asia-oriental.html [Accessed 21 Noviembre 2011].

Henrikson, R. & Edwards, M., 2011. *The 2011 Algae competition*. [Online] Available at: <http://www.algaecompetition.com/algae-competition/1design/> [Accessed 19 Noviembre 2012].

Henrikson, R. & Edwards, M., 2012. *Imagine our algaefuture, visionary algae architecture and landscape designs, International Algae Competition*. Richmond, CA: Ronore Enterprises.

Hindersin, S., Leupold, M., Kerner, M. & Hanelt, D., 2012. Irradiance optimization of outdoor microalgal cultures using solar tracked photobioreactors. *Bioprocess Biosyst Eng*.

Hornbein, T.F. & Schoene, R.B., eds., 2001. *High Altitude An exploration of Human Adaptation*. University of Washington School of Medicine ed. Seattle, Washington: Marcel Dekker, Inc..

Houston, C.S., 2001. The Growth of Knowledge About Air, Breathing, and Circulation as they Relate to High Altitude. In T. Hornbein, ed. *High Altitude, An Exploration of Human Adaptation*. Burlington, Vermont. pp.1-23.

Ibisch, P.L., Beck, S.G., Gerkmann, B. & Carretero, A., 2012. *Bolivia Bryophyte Project*. [Online] Available at: www.tropicos.org [Accessed 4 Noviembre 2012].

ISO7730, 2005. *Ergonomics of the thermal environmet - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. International Organization for Standardization.

Knoshaug, E.P. & Darzins, A., 2011. Algal biofuel: the proces; The production of algal biofuels involves algal cultivation, biomass harvesting and dewatering, lipid extraction and converted to fuel. *Society for Biological Engineering* , pp.37 -47.

Larocca, S., 2011. *Tu Tiempo*. [Online] Available at: http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm [Accessed 2 Diciembre 2011].

Littlejohn, C.E. & Meenaghham, G.F., 1959. *An introduction to chemical engineering*. New York: Reinhold Publishing Corporation.

Loera-Quezada, M.M. & Olguín, E.J., 2010. Las microalgas oleaginosas coomo fuente de biodiesel: retos y oportunidades. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 1(1), pp.91 - 116.

Maldonado, M. et al., 2011. Biodiversity in Aquatic Systems of the Tropical Andes. In R.M.P.M.J.H.T. Sebastian K. Herzog, ed. *Climate Changes and Biodiversity in the tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) and Scientific Committee on Problems of the Environment. pp.276 -294.

Masojídek, J. et al., 2003. A closed solar photobioreactor for cultivation of microalgae under supra-high irradiance: basic design and performance. *Journal of Applied Phycology*, 15, p.239–248.

Masojídek, J. et al., 2009. A two-stage solar photobioreactor for cultivation of microalgae based on solar concentrators. *J Appl Phycol*, 21, p.55–63.

Mayorga, J.R., 2005. *Modelo Holístico para Analizar el Confort Térmico del Ser Humano dentro de los edificios*. Ciudad de México: UNAM.

Miller, K. & Levine, J., 2004. *Biologia*. Massachusetts: Prentice Hall.

Molina, E., Fernández, J., Ación, F.G. & *, Y.C., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology*, 92, p.113–131.

Molina, E., Fernández, J., Ación, F.G. & Chisti, Y., 2001. Tubular photobioreactor design for algal cultures. *Journal of Biotechnology* 92 (2001) 113–131, (92), p.113–131.

- Morales, E.A. et al., 2008. ALGAL STUDIES IN BOLIVIA: A COMPILATION AND PRELIMINARY ANALYSIS OF EXISTING PHYCOLOGICAL LITERATURE. *Gayana Bot.*, 1(65), pp.93-109.
- Morató, I.G., n.d. *Diccionario Etimológico*. [Online] Available at: <http://iesgarciamorato.org/Diccionario.htm#DICCIONARIO> [Accessed 20 Noviembre 2011].
- Netto, D.V., n.d. *Fisicanet*. [Online] Available at: http://www.fisicanet.com.ar/biologia/metabolismo/ap17_etapas_de_la_fotosintesis.php [Accessed 20 Noviembre 2011].
- Niermeyer, S., Zamudio, S. & Moore, L.G., 2001. The People. In R.B.S. Thomas Hornbein, ed. *High Altitud, An Exploration of Human Adaptation*. Denver, Colorado. pp.43 - 99.
- OMS, 1946. CONSTITUCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Nueva york, EEUU, 1946.
- Palmer N., R., 2011. *FECYT*. [Online] IES de Buñol Available at: http://intercentres.cult.gva.es/iesbu%F10l/html/Departamentos/FyQ/iupiter_radio/index.htm [Accessed 4 de Enero de 2012 Enero 2012].
- Payne, J.L. et al., 2011. The evolutionary consequences of oxygenic photosynthesis: a body size perspective. *Photosynth Res*, 107, p.37–57.
- Poulton, E.C., 1970. *Environment and Human Efficiency*. Springfield: Charles C. Thomas Publisher.
- RAE, 2011. *Diccionario de la lengua española*. Madrid: REAL ACADEMIA ESPAÑOLA.
- Salazar, M.G., 2006. Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *Contactos*, 59, pp.64-70.
- Servant-Vildary, S., 1991. Las Diatomeas. In ORSTOM, ed. *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento Limnológico actual*. La Paz, Bolivia: ORSTOM - HISBOL. pp.181 -232.
- Shuler, R.L. & Affens, W.A., 1970. Effect of Light Intensity and Thickness of Culture Solution on Oxygen Production by Algae. *Applied Microbiology*, Vol. 19(No.1), pp.76-86.
- Slegers, P.M., Wijffels, R.H., van Strate, G. & van Boxtel, A.J.B., 2011. Design scenarios for flat panel photobioreactors. *Applied Energy* , 88, p.3342–3353.
- Spolaore, .P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. & Isambert, A., 2006. Commercial Applications of Microalgae. *JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERIN*, 101(2), pp.87 - 96.
- Steller, D.L., Hernández A., J.M., Rodríguez, R. & Cabello P., A., 2007. Efecto de la Temperatura sobre las tasas de Fotosíntesis, crecimietno y calcificación del alga coralina de vida libre *Lithophyllum Magaritae*. *Ciencias Marinas*, 33(04), pp.441 -456.

- Subils, M.J.B., 2002. *Estrucplan online*. [Online] Available at: <http://www.estrucplan.com.ar/producciones/entrega.asp?identrega=363> [Accessed 16 Noviembre 2011].
- Szocolay, S.V., 1980. *The environmental Science Handbook for architects and builders*. Lancaster: The Construction Press.
- Treshow, M. & Anderson, F.K., 1989. *Plant Stress from air pollution*. Bath, Avon UK: John Wiley & Sons.
- Vermaas, W., 1998. *An Introduction to Photosynthesis and its applications*. [Online] Center for the Study of Early Events in Photosynthesis Arizona State University Available at: <http://bioenergy.asu.edu/photosyn/education/photointro.html> [Accessed 20 Octubre 2011].
- Visión Marítima, P.D., 2011. *Visionmaritima.com*. [Online] Available at: http://www.visionmaritima.com.uy/vision-maritima/index.php?option=com_content&view=article&id=1884:calentamiento-de-oceanos-amenaza-extinguir-algas&catid=53:ecologia&Itemid=83 [Accessed 21 Noviembre 2011].
- Wagner, P.D., 2001. Gas Exchange. In T.F. Hornbein & S.R. B., eds. *High Altitude: An exploration of human adaptation*. La Jolla, California. pp.199 -233.
- West, J.B., 1981. *Fisiología Respiratoria*. Tercera ed. Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana S.A.
- West, J.B., 1995. Oxygen enrichment of room air to relieve the hypoxia of high altitude. *Respiration Physiology*, 99, pp. 225-232.
- West, J.B., 2001. The Atmosphere. In *High Altitude: An Exploration of Human Adaptation*. La Jolla California: marcel Dekker, Inc. pp.25 - 41.
- Zijffers, J.-W.F., Janssen, M., Tramper, J. & Wijffels, R.H., 2008. Design Process of an Area-Efficient Photobioreactor. *Mar Biotechnol*, 10, p.404–415.

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1.- Esquema general del trabajo propuesto. (Elaboración propia)	17
Ilustración 2.- Presión de O ₂ inhalado y saturado según la altitud. Elaboración propia basada en (Wagner, 2001).	24
Ilustración 3.- Mecánica de la respiración (Britannica, 2006)	25
Ilustración 4.- Esquema de las vías aéreas humanas según Weibel. Donde Z se refiere a las generaciones; BR: Bronquios, BL Bronquiolo; BLT: Bronquiolo terminal; BLR: Bronquiolo Respiratorio; CA: Conducto Alveolar; SA: Saco Alveolar	27
Ilustración 5.- Tiempo que el oxígeno tarda en recorrer el capilar en condiciones de presión de oxígeno normales (PO ₂) (West, 1981), como se aprecia, el O ₂ tarda apenas 0.25 segundos en traspasar la pared capilar.	28
Ilustración 6.- Curva de disociación del O ₂ , (línea Continua), para un pH 7, 4; PCO ₂ de 40 mmHg y 37°C de Temperatura. La concentració total de O ₂ se muestra también para una concentración de hemoglobina de 15g/100mL de sangre.	29
Ilustración 7.-Diferencias en las Presiones Atmosféricas e inhaladas a medida que se incrementa la altitud	29
Ilustración 8.- Modelo holístico formal representado el confort Térmico del ser humano (Mayorga, 2005)	38
Ilustración 9.- Importancia de las diferentes condiciones para la satisfacción total respecto a la Calidad del Ambiente Interior (IEQ), el número más alto indica mayor importancia (Frontczak & Wargocki, 2011)	40
Ilustración 10.- Límites de la temperatura del aire de la zona de confort térmico (Mayorga, 2005)	42
Ilustración 11.- Escala Térmica de 7 puntos (ISO7730, 2005)	43
Ilustración 12.- Confort térmico para diferentes categorías de ambiente y tipos de espacios, Donde PPD se refiere al Porcentaje porcentual de insatisfacción, PMV, Voto Previsto Promedio, DR% Porcentaje de insatisfacción por la corriente de aire, PD% Porcentaje de insatisfacción debido a los tres parámetros indicados. (ISO7730, 2005)	43
Ilustración 13.- Niveles de Ruido desde el nivel de audición hasta límites extremos de dolor. (Álvarez, 2004)	45
Ilustración 14.- Espectro de luz visible y radiación ultravioleta e infrarroja (Palmer N., 2011)	47
Ilustración 15.- Principales fuentes productoras de olores (Subils, 2002)	50
Ilustración 16.- Valores de referencia para algunas sustancias en el aire, según la OMS, basados en molestias sensoriales por olor y en efectos para la salud, no cancerígenos. (Subils, 2002)	51
Ilustración 17.- Estimación del número de personas que viven sobre los 2500 msnm (hasta 1995). Elaboración propia basada en la tabla del Cap. 2 de Hight Altitude (Hornbein & Schoene, 2001)	52
Ilustración 18.- A.- Evolución el Oxígeno atmosférico y el tamaño máximo de los organismos vivos a lo largo del tiempo geológico. Las líneas punteadas y flechas indican los límites inferior y superior de los niveles de oxígeno, la línea gris suave, indica la mejor estimación de la evolución de la PO ₂ . B.- Tamaños de los fósiles conocidos más grandes a lo largo de la historia, los triángulos rojos representan procariotas, los círculos amarillos representan los protistas, los cuadrados azules representan los animales y los diamantes verdes representan las plantas vasculares. (Payne et al., 2011)	58
Ilustración 19 Imagen de la Aurora Boreal tomadas por personal de la NASA, ISS, desde la Estación Espacial Internacional en los meses de Agosto a Octubre de 2011	61
Ilustración 20.- Clasificación de los rayos ultravioletas según la longitud de onda y la absorción de los mismos por el ozono, (Elaboración propia)	62
Ilustración 21.- Imágenes tomadas por personal de la NASA, ISS, desde la Estación Espacial Internacional en los meses de Agosto a Octubre de 2011, se puede apreciar el grosor de la atmósfera sobre el planeta. Se observa tanto el mar como áreas continentales	63
Ilustración 22.- La presión atmosférica ejercida sobre la superficie terrestre, las flechas amarillas indican mayor o menor presión según la altura donde se midan. (Elaboración propia)	64
Ilustración 23.-Tabla de presiones atmosféricas, en la columna de la izquierda se muestran los millares y en la línea superior los cientos. (Larocca, 2011)	66
Ilustración 24.-Tabla de presiones atmosféricas para algunas de las ciudades más altas del mundo. Elaboración propia basada en la altura de algunas de las ciudades más altas del mundo y la fórmula anterior (Larocca, 2011). Se ha resaltado la ciudad de La paz, Bolivia al ser ésta la ciudad donde se realiza la propuesta del presente trabajo	66
Ilustración 25.- Elaboración propia, densidad del aire en algunas de las ciudades más altas del mundo.	67
Ilustración 26.- Composición del aire, elaboración propia según datos de Littlejohn & Meenaghham, (1959)	68
Ilustración 27.- Cantidad de Oxígeno (Kg/m ³) en el aire según la altura, Presión atmosférica y la densidad en algunas de las ciudades más altas del mundo, elaboración propia.	69
Ilustración 28.- Forma de reproducción combinada, asexual y sexual (Dery, 2005, 2011)	74
Ilustración 29.- Ciclos de reproducción de la Chlamidomona	75
Ilustración 30.- Algas rojas o rodófitas	76
Ilustración 31: Algas feoficofitas pardas (Cubas, 2008)	77
Ilustración 32.- Algas Clorofitas http://biologialatina.blogspot.com/2009/02/reino-protista.html	77
Ilustración 33.- Algas acuáticas (Visión Marítima, 2011)	78
Ilustración 34.- Algas terrestres en Taiwán (Han, 2010)	82

Ilustración 35.- Mapa de las eco regiones de Bolivia. (Ibisch et al., 2012)	83
Ilustración 36.- Categorización (de los estudios realizados en Bolivia sobre algas) basada en el área geográfica cubierta, sólo para referencias taxonómicas (54 referencias). (Morales et al., 2008).....	85
Ilustración 37.- Categorización basada en la división/Phylum algal, solo para referencias taxonómicas. (Morales et al., 2008)	85
Ilustración 38.- Imagen de Google Earth donde se han colocado aproximadamente las estaciones del lago Titicaca de donde se han tomado las muestras del fitoplancton. Elaboración propia según el mapa encontrado en (Servant-Vildary, 1991)	86
Ilustración 39.- Especies de fitoplacnton encontradas en 11 estaciones de monitoreo en el Lago Titicaca, zona Boliviana. (Servant-Vildary, 1991).....	87
Ilustración 40.- Proceso de la fotosíntesis (Asimov, 1968)	89
Ilustración 41.- Espectro de absorción en las especies clorofílicas y carotinoides (Vermaas, 1998).....	90
Ilustración 42.- Esquema Global de la Fotosíntesis (Netto, n.d.)	91
Ilustración 43.- "Ruptura" del agua, proceso que se da dentro del Fotosistema II (1)	91
Ilustración 44.- Proceso de Respiración (Asimov, 1968) (2)	93
Ilustración 45.- El ciclo del Carbono (Asimov, 1968)	93
Ilustración 46.- Esquema de los diferentes productos que nos ofrecen los cultivos de las algas así como las soluciones que su cultivo ofrece al medio ambiente. (Henrikson & Edwards, 2011)	95
Ilustración 47.- Productividad de aceites de microalgas en comparación con los cultivos convencionales, donde Microalgas (1) 30% de aceite en biomasa (con base a peso seco) y Microalgas (2) 70% de aceite en biomasa (con base a peso seco) (Loera-Quezada & Olguín, 2010).....	97
Ilustración 48.- Esquema de la producción de oxígeno biogénico, según Eugene I. Rabinovich (Asimov, 1973).....	108
Ilustración 49.- Esquema de una laguna abierta (Chisti, 2007) y fotografía del mezclador del cultivo.....	110
Ilustración 50.- Vista aérea de una laguna abierta para el cultivo de microalgas <i>Raceway Ponds for Microalgae Production (Earthrise Farms, California, USA)</i>	110
Ilustración 51.- Esquema de un fotobiorreactor, su orientación y disposición en terreno (Chisti, 2007)	111
Ilustración 52.- Esquema de un fotobiorreactor con la columna para desgasificación del cultivo (eliminación y captura del O ₂ (Chisti, 2007)	112
Ilustración 53.- Paneles de vidrio que permiten una iluminación natural de los Fotobiorreactores construidos en el laboratorio del Centro Académico y Universitario en Nove Hradý, República Checa. (Masojídek et al., 2009)	114
Ilustración 54.- Vistas interiores del mismo proyecto (Masojídek et al., 2009)	115
Ilustración 55.- Un proceso integrativo de biocombustible algal debe capturar CO ₂ de una planta de energía o una industria, obtener los nutrientes de las aguas residuales u otra fuente de agua no potable e incorporar un reciclaje significativo. (Knoshaug & Darzins, 2011)	115
Ilustración 56.- Comparativa entre las características de los cultivos en lagunas y fotobiorreactores (Chisti, 2007)	116
Ilustración 57.- Resumen de las ventajas y desventajas de ambos sistemas en relación al presente trabajo, elaboración propia en base a toda la bibliografía consultada.	117
Ilustración 58.- Esquema general de la Propuesta, elaboración propia.	121
Ilustración 59.- Presión de Oxígeno (PO ₂) en el aire y Presión alveolar de Oxígeno (PAO ₂) para diferentes altitudes	122
Ilustración 60.-Enriquecimiento del aire con O ₂ y altitud equivalente.	123
Ilustración 61.-Escala de alturas equivalentes en función a la altitud real y el enriquecimiento de O ₂	124
Ilustración 62.- Tabla de Cálculo 1. Tasa de producción de CO ₂ (Fuentes & Rodríguez, 2004)	126
Ilustración 63.- Tabla de Cálculo 2. Nivel de Contaminación según el tipo de asentamiento.	127
Ilustración 64.- Producción promedio de O ₂ en relación con la latitud y la variación estacional para cultivos operados con una densidad aproximada de 40g/m ² (Pesado en seco), según lo estimado en modelo matemático, (Grobelaar et al., 1988).....	132
Ilustración 65.- Producción diaria de biomasa par un período de un año y P. Tricornutum. De arriba abajo: Página anterior: A.- latitud correspondiente a Holanda, B.- Francia y C.- Alergia. El eje vertical izquierdo representa la producción de biomasa, el derecho la longitud del día en horas. (Slegers et al., 2011)	133
Ilustración 66.- Constante de Saturación de luz en relación a la Intensidad de la luz solar y la tasa de crecimiento específica (Chisti, 2007)	134
Ilustración 67.- Imagen de la radiación solar Superior Inferior: Hemisferio occidental http://www.iluminasol.com/	135
Ilustración 68.- Imágenes tomadas de de Google Earth, a la Izquierda, la ubicación de Bolivia y al a derecha, un acercamiento a la Ciudad de La Paz. (Imagen tomada de Google Earth)	138
Ilustración 69.- Vista del Terreno completo a detalle donde se pueden observar las edificaciones existentes. (Imagen tomada de Google Earth)	138
Ilustración 70.- Imagen de los cálculos realizados para obtener la cantidad de O ₂ necesario para el enriquecimiento de la Escuela René Barrientos, en La Paz, Bolivia. (Imagen ampliada en Anexo 2)	139
Ilustración 71.- Imagen de los cálculos realizados para obtener el volumen de fotobiorreactores necesario para obtener 368.28 m ³ de O ₂ /hora. (Imagen ampliada en Anexo 3).....	139
Ilustración 72.- Imágenes de fotobiorreactores diseñados especialmente para la Escuela René Barrientos, en La Paz, Bolivia	143

Ilustración 73.- Imagen tomada de Google Earth de la Viacha, población desarrollada en base a la Fábrica de Cemento ubicada al Noroeste de la población. (Imagen tomada de Google Earth)	147
Ilustración 74.- Detalle de la Fábrica de Cemento SOBOCE (Viacha, Departamento de La Paz, Bolivia) (Imagen tomada de Google Earth).....	148
Ilustración 75.- Imagen nocturna de la Planta de Cemento Viacha. (SOBOCE)	148
Ilustración 76.- Imágenes tomadas de la página http://www.algaecompetition.com/algae-slideshows/algae-architecture ; del concurso propuesto por (Henrikson & Edwards, 2012).....	153

Glosario

Glosario

A

Aclimatación: Capacidad de un organismo a realizar, en un período corto de tiempo ciertos cambios fisiológicos para vivir en un medio diferente al suyo, los cambios son temporales y no son heredados a la siguiente generación.

Adaptación: El proceso de adaptación implica cambios en diferentes aspectos de un organismo que le permite no solo sobrevivir a un medio diferente al suyo, sino que le permite heredar a sus descendientes esas características de tal manera que las nuevas generaciones estarán totalmente adecuadas al medio.

Alvéolos: Los alveolos pulmonares son cavidades terminales de los bronquios donde se realiza el intercambio hematogaseoso

Altitud. Parámetro para ubicar un lugar, es la distancia vertical entre un lugar ubicado en la tierra y el nivel del mar, se mide en metros (msnm).

B

Barrera hematogaseosa: Pared alveolar y capilar formada por células a través de las cuales se difunden los gases hacia la sangre y al interior del organismo o hacia los pulmones y al exterior del organismo

Bienestar: en el presente trabajo está relacionado con el uso del medio artificial, es decir con el medio construido y la capacidad de este de brindar comodidad de manera inmediata y salud a largo plazo a las personas que lo habitan

Biogénico: Se refiere al oxígeno, elemento creado por organismos vivos a través del proceso de fotosíntesis.

Biocombustible: Combustible derivado de organismos vivos como los cultivos de palma o las microalgas

C

Clorofluorocarbonos: hidrocarburos en los que han sustituido los átomos de hidrogeno por átomos de cloro o fluor. Son altamente dañinos para la atmósfera por su capacidad de destrucción del ozono.

Cloroplastos: Son los órganos asociados a la clorofila gracias a los cuales es posible el proceso de la fotosíntesis.

Confort: Según la RAE es un galicismo que se puede definir como "aquello que produce bien estar y comodidades". Se refiere al estado cuando las personas no sienten la necesidad de cambiar las condiciones que habitan porque se sienten completamente cómodas, es decir que se hace referencia al grado de bienestar dentro de un ambiente determinado y que está relacionado con ciertos rangos de la temperatura, humedad, el sonido la iluminación o la calidad del aire.

Cuerpo carotideo: Es un quimiorreceptor ubicado en el cuello, en la bifurcación de la arteria carótida, que tiene como función controlar el ritmo de la respiración y la frecuencia cardíaca, reacciona de inmediato ante la carencia o la reducción de oxígeno en la sangre.

D

Desoxihemoglobina: Hemoglobina que ha descargado las moléculas de oxígeno en los tejidos

Diafragma: Músculo que está ubicado en la cavidad torácica por debajo de los pulmones y que forma parte de la mecánica respiratoria. El movimiento del diafragma determina la expansión o la contracción de los pulmones lo que provoca las dos fases de la respiración la inhalación y la exhalación.

Difusión: capacidad de un gas de atravesar una membrana o barrera por diferencia (gradiente) de presión entre los dos lados de la barrera, según la ley de difusión de gases la transferencia de una gas es directamente proporcional a la superficie de difusión e inversamente proporcional al grosor de la membrana o barrera.

E

Edema pulmonar: Acumulación anormal de líquido en los pulmones, puede ser causado por la poca difusión de oxígeno hacia el organismo, si se relaciona con grandes altitudes. Los síntomas incluyen la dificultad respiratoria, sensación de asfixia, sonidos roncacos al respirar, ansiedad, inquietud, falta de concentración, piel pálida, labios morados.

Estanco: se hace referencia a los espacios totalmente cerrados que evitan el paso del aire

F

Fotosíntesis Capacidad de algunos organismos de utilizar la energía de la luz para transformarla en energía química, convierten el agua y el bióxido de carbono en carbohidratos utilizando la energía de la luz y eliminando el oxígeno como elemento de desecho.

Fotoinhibición: Estado de letargo de las microalgas en el dejan de realizar la fotosíntesis e inician la etapa de respiración, se produce debido a una intensidad luminosa muy alta que satura a los microorganismos.

H

Hemoglobina: (Hb) Heteroproteína de la sangre que tiene la función de transportar el oxígeno desde el sistema respiratorio hasta los tejidos, así como el bióxido de carbono desde estos hasta los pulmones, también participa en la regulación del pH de la sangre.

Hipoxemia Disminución anormal de la presión parcial de oxígeno en la sangre arterial, causada generalmente por una disminución de la presión inspirada de oxígeno (PIO_2). Depende de la presión atmosférica y del contenido de oxígeno en el aire inspirado.

Hipoxia: Disminución de la difusión de oxígeno en los tejidos y las células.

I

Iluminancia Cantidad de flujo luminoso que incide en una superficie, se mide en lux (lux= lúmenes/m²)

Intercambio hematogaseoso: Intercambio de gases entre el medio externo y el interior del cuerpo humano que ocurre a nivel pulmonar entre el alveolo, que contiene aire y el capilar que contiene sangre.

L

Luminancia Cantidad de luz reflejada desde una superficie en una dirección específica, se expresa en Candelas/m²

M

Mal de Montaña agudo (MMA) Malestar asociado a la altitud que aparece al poco tiempo de haber ascendido y tiende a desaparecer a los pocos días, aunque en ciertos casos puede agravarse.

Mal de montaña crónico (MMC) Malestar asociado a la altitud que aparece en las personas que viven durante muchos años en zonas de altura, asociado con la presión alta y otros síntomas no tiene cura mientras se viva en altitud.

Membrana hematogaseosa: Ver barrera hemoatogaseosa.

Menarquía: Aparición de la primera menstruación

Micrómetros (μm): Unidad de longitud que equivale a una millonésima parte de un metro (10^{-6}m)

Metros sobre el nivel del mar: Medida de altitud respecto al nivel de mar (msnm) que se considera una altitud de cero metros (0m), es una medida referencial para ubicar la altitud de localidades o accidentes topográficos. La altitud puede definir, la presión atmosférica de la localidad, el clima, la vegetación, etc.

N

Nanómetros (nm): Equivale a la milmillonésima parte de un metro (10^{-9}m) y sirve para medir la longitud de onda de la radiación ultravioleta.

O

Oxihemoglobina: Hemoglobina que va cargada con moléculas de oxígeno, es la encargada de transportarlo hacia los tejidos

P

Patchwork se hace referencia a este arte de crear piezas nuevas y completas uniendo retazos de telas para definir la forma en la que se ha realizado la investigación del trabajo.

Policitemia o eritrositosis Aumento en los glóbulos rojos de la sangre, se presenta generalmente como una defensa a la baja presión de oxígeno en la sangre, es una de las patologías comunes en zonas de altura.

Predicted Percentage Dissatisfied: Porcentaje de Insatisfacción Estimada basándose en ciertos rangos de confort térmico este parámetro de confort establece en porcentaje el número de personas que se verán en confort y en discomfort en un ambiente con ciertas características térmicas. Se asume que en el mejor de los casos, habrá al menos un 5% del total de personas que estén en discomfort.

Preclampsia. Complicación del embarazo relacionada con la alta presión arterial, pone en peligro la vida tanto de la madre como del feto, es muy frecuente en zonas de altura por lo que ha sido asociada con la hipoxia típica de las zonas altas.

Presión alveolar de oxígeno: Presión parcial de oxígeno a nivel alveolar (P_{AO_2}), la presión del aire inspirado varía a medida que recorre las vías respiratorias, al llegar a los alvéolos es 47mmHg. más baja que la presión inicial total del aire, es decir que si al inspirar se tiene una presión total de 760mmHg, al llegar a los alveolos se tiene 713 mmHg, la P_{AO_2} corresponde al 21% del total ya que se refiere exclusivamente al oxígeno que corresponde aproximadamente al 21% del total del aire. Entonces, en este caso, la $P_{AO_2} = 149.73$ mmHg.

Presión parcial de oxígeno: (P_{O_2}) Se refiere exclusivamente a la presión correspondiente al oxígeno en el aire, dado que este representa aproximadamente un 21% del total del aire, si se conoce la presión atmosférica total se puede calcular fácilmente la presión parcial de oxígeno

R

Radiación solar: conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, las mismas que se agrupan en el espectro luminoso, que comprende desde los rayos infrarrojo hasta los ultravioletas, dentro de ese espectro, el ser humano solo percibe una parte muy pequeña del mismo, llamada luz visible.

Raquitismo: Enfermedad producida por una deficiente nutrición que provoca carencia de calcio y fósforo en la sangre y la desmineralización de los huesos, se caracteriza por deformidades del esqueleto.

Reproducción de color, CRI: Capacidad de la luz de reproducir el color, se mide en porcentaje. La más alta reproducción de color la encontramos en la luz natural y en las lámparas incandescentes.

S

Sherpas: Población de las zonas altas de Nepal, considerada la población mejor adaptada a la altitud, especialmente por presentar muy poco mestizaje con personas que habitan en zonas más bajas.

T

Temperatura de color Tonalidad aparente de una fuente luminosa Fría de 4100 K adelante; neutra de 3100 a 4000 K y Cálida de 3000 a 1500 K

V

Voto Promedio Previsto es un índice establecido por el voto de un grupo de varias personas basado en el equilibrio térmico del cuerpo humano utilizando una escala en la que 0 es neutro, 3 es muy caliente y -3 es muy frío.

Y

Yac: Bóvido de gran tamaño nativo de las montañas del Asia Central, vive entre los 4000 y los 6000 msnm.

Anexos
